

ALFONSO RODRIGO TIERRA CRIOLLO

**METODOLOGIA PARA A GERAÇÃO DA MALHA DE ANOMALIAS  
GRAVIMÉTRICAS PARA OBTENÇÃO DE GEÓIDE GRAVIMÉTRICO  
LOCAL A PARTIR DE DADOS ESPARSOS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas

CURITIBA

2003

**“METODOLOGIA PARA A GERAÇÃO DA MALHA DE  
ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS PARA OBTENÇÃO DE  
GEÓIDE GRAVIMÉTRICO LOCAL A PARTIR DE DADOS  
ESPARSOS”**

**POR**

**ALFONSO RODRIGO TIERRA CRIOLLO**

Tese nº 032 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no  
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade  
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

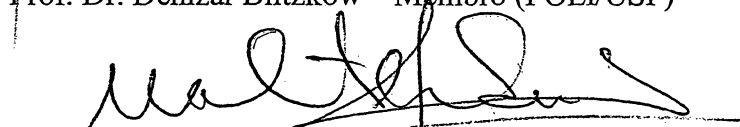
Curitiba, 18 de dezembro de 2003.



Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas - Orientador e Presidente (UFPR)



Prof. Dr. Denizar Blitzkow – Membro (POLI/USP)



Eng. Dr. Walter Humberto Subiza Piña - Membro (Grant Geophysical do Brasil)



Profª. Drª. Sílvia Helena Soares Schwab - Membro (UFPR)



Prof. Dr. Camil Gemaël – Membro (UFPR)



Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto- Membro (UFPR)

## AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar os agradecimentos as diferentes pessoas e instituições que fizeram possível o presente trabalho mediante sua colaboração incondicional.

Ao Professor Dr. Sílvio Correia de Freitas, pela sua orientação realizada, a paciência demonstrada na correção do trabalho e a compreensão demonstrada ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Dr. Walter Subiza que forneceu os dados topográficos do modelo GTOPO30.

Ao professor Dr. Denizar Blitzkow da Sub-Comissão de Gravidade e Geóide para a América do Sul – SCGGAS, pela ajuda, colaboração com os dados gravimétricos, e sugestões oportunas.

Às instituições Geophysical Exploration Technology do Reino Unido – GETECH, Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia – IGAC, al Ministerio de Enregía y Minas del Ecuador – MEM, pelo fornecimento de dados gravimétricos, e ao Instituto Geográfico Militar do Equador – IGM pela colaboração. Ao Ing. Geólogo Ramiro Pino quem ajudou com o mapa geológico e com seu conhecimento para a elaboração dos perfis geológicos

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, pelos ensinamentos e dedicação.

À Sra Verali Mônica Kleuser Reguilin, Secretária do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR.

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação, pelo alegre convívio

A Guataçara dos Santos Júnior pela ajuda incondicional na elaboração do documento final.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos.

À Escuela Politécnica del Ejército del Ecuador, pela oportunidade e crédito, através da concessão de afastamento e pelo apoio financeiro recebido.

A todas as pessoas e instituições que de forma direta ou indiretamente contribuíram na elaboração deste trabalho.

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado a minha esposa Mercy e a minha filha Mishell, pelo apoio, incentivo e principalmente pela compreensão nos momentos de ausência, e pelo tempo que este trabalho nos separou, deixando de fazer e aproveitar muitas coisas juntos.



## SUMÁRIO

|   |             |
|---|-------------|
| <b>SUMARIO .....</b>                                | <b>v</b>    |
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                       | <b>viii</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>                       | <b>xi</b>   |
| <b>LISTA DAS PRINCIPAIS SIGLAS .....</b>            | <b>xiv</b>  |
| <b>RESUMO .....</b>                                 | <b>xv</b>   |
| <b>RESUMEN .....</b>                                | <b>xvi</b>  |
| <br>  |             |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                           | <b>1</b>    |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....                | 1           |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....                             | 2           |
| 1.3 OBJETIVOS .....                                 | 4           |
| 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA .....                     | 4           |
| <b>2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS .....</b>               | <b>5</b>    |
| 2.1 POTENCIAL DA GRAVIDADE REAL .....               | 5           |
| 2.1.1 Potencial da Gravidade Normal .....           | 8           |
| 2.1.2 Potencial Perturbador ou Anômalo .....        | 12          |
| 2.1.3 Anomalias da Gravidade .....                  | 12          |
| 2.1.4 A Fórmula de Stokes .....                     | 14          |
| 2.1.5 Reduções Gravimétricas .....                  | 17          |
| 2.1.5.1 O efeito indireto .....                     | 17          |
| 2.1.5.2 Reduções de ar livre e de Bouguer .....     | 18          |
| 2.1.5.3 Condensação de Helmert .....                | 22          |
| 2.1.6 Técnica Remove-Restore .....                  | 22          |
| 2.2 REDE NEURAL ARTIFICIAL .....                    | 25          |
| 2.2.1 Vantagens da RNA .....                        | 27          |
| 2.2.2 Fundamentos de um Neurônio Biológico .....    | 28          |
| 2.2.3 Caraterística de um Neurônio Artificial ..... | 30          |
| 2.2.3.1 Funções de transferência .....              | 31          |
| 2.2.4 Arquitetura de una RNA .....                  | 34          |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.2.5 Aprendizado da RNA .....   | 35        |
| 2.2.6 Rede Neural Multicamadas .....   | 36        |
| 2.2.6.1 Treinamento de uma RNAM .....  | 37        |
| 2.2.7 Rede Neural de Funções de Base Radial .....  | 41        |
| <b>3 DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS .....</b>  | <b>45</b> |
| 3.1 DADOS GRAVIMÉTRICOS .....  | 46        |
| 3.2 DADOS TOPOGRÁFICOS .....   | 47        |
| 3.3 MODELO GEOPOTENCIAL .....  | 48        |
| 3.4 DADOS DE DENSIDADES .....  | 49        |
| 3.5 DADOS DE CONTROLE PARA A AVALIAÇÃO DA REDE NEURAL<br>TREINADA .....                              | 51        |
| 3.6 DADOS DE CONTROLE DOS MODELOS GEOIDAIS .....   | 54        |
| <b>4 METODOLOGIA E RESULTADOS .....</b>  | <b>59</b> |
| 4.1 DETERMINAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO GEOIDAL DO<br>EGM96 .....                                     | 59        |
| 4.1.1 Anomalia Ar-Livre e Ondulação Geoidal do Modelo EGM96 .....                                    | 61        |
| 4.2 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DAS ANOMALIAS DO AR LIVRE<br>E BOUGUER .....                             | 69        |
| 4.2.1 Cálculo da Anomalia do Ar-Livre .....  | 69        |
| 4.2.2 Cálculo da Anomalia de Bouguer .....   | 70        |
| 4.3 TREINAMENTO DA REDE NEURAL ARTIFICIAL .....  | 82        |
| 4.3.1 Treinamento da RNA para a Geração do Modelo Digital de<br>Variação Lateral de Densidades ..... | 82        |
| 4.3.2 Treinamento e Predição da RNA para Anomalias Gravimétricas<br>de Ar-Livre .....                | 84        |
| 4.3.2.1 RNA para a predição de anomalias do ar-livre .....   | 85        |
| 4.3.2.2 RNA para determinação da anomalia de Bouguer .....   | 92        |
| 4.3.2.2.1 Cálculo da anomalia de ar-livre a partir da anomalia de<br>Bouguer .....                   | 98        |
| 4.3.3 Cálculo Anomalia Ar-Livre mediante interpolação por Kriging .....                              | 100       |
| 4.4 CÁLCULO DOS MODELOS GEOIDAIS .....   | 102       |
| 4.4.1 CÁLCULO DAS ANOMALIAS RESIDUAIS .....  | 103       |
| 4.4.2 CÁLCULO DAS ONDULAÇÕES RESIDUAIS .....   | 105       |

|   |            |
|---|------------|
| 4.4.3 ONDULAÇÕES GEOIDAIS RESULTANTES .....                 | 106        |
| <b>5 GERAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO GEOIDAL .....</b>        | <b>110</b> |
| 5.1 AVALIAÇÃO ABSOLUTA .....                                | 110        |
| 5.2 AVALIAÇÃO RELATIVA .....                                | 113        |
| 5.3 RESUMO DA AVALIAÇÃO E ESCOLHA DO MODELO GEOIDAL ...     | 122        |
| <b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>                  | <b>125</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                     | <b>128</b> |
| <br>  |            |
| <b>ANEXO I PROGRAMA DE UMA REDE NEURAL PROBABILISTICA</b>   | <b>133</b> |
| <b>ANEXO II PROGRAMA DE UMA REDE NEURAL MULTICAMADA ...</b> | <b>136</b> |
| <b>ANEXO III PROGRAMA DE UMA REDE NEURAL RBF .....</b>      | <b>139</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2.1 ANOMALIA DA GRAVIDADE .....                                     | 12 |
| FIGURA 2.2 CAMADAS GEOLÓGICAS .....  | 21 |
| FIGURA 2.3 NEURÔNIO BIOLÓGICO .....  | 29 |
| FIGURA 2.4 PASSOS DE PROCESAMENTO DO NEURÔNIO<br>ARTIFICIAL .....          | 30 |
| FIGURA 2.5 FUNÇÃO DE TRANSFÊRENCIA LINEAR .....                            | 32 |
| FIGURA 2.6 FUNÇÃO DE TRANSFÊRENCIA SIGMOIDAL TANGENTE<br>HIPERBOLICA ..... | 33 |
| FIGURA 2.7 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA COMPETITIVA .....                       | 33 |
| FIGURA 2.8 REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA) .....                              | 37 |
| FIGURA 2.9 REGRA DE PARADA ANTECIPADA BASEADA NA<br>VALIDAÇÃO .....        | 40 |
| FIGURA 2.10 ESTRUTURA DE UMA REDE RBF .....                                | 42 |
| FIGURA 3.1 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS DADOS<br>GRAVIMÉTRICOS .....        | 45 |
| FIGURA 3.2 RELEVO TOPOGRAFICO A PARTIR DO MDT GTOPO30 ....                 | 48 |
| FIGURA 3.3 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AVALIAÇÃO DA RNA .....                | 52 |
| FIGURA 3.4 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE<br>ABSOLUTOS .....           | 56 |
| FIGURA 4.1 ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDA DO EGM96 COM<br>MALHA DE 5km .....  | 61 |
| FIGURA 4.2 ONDULAÇÃO GEOIDAL OBTIDA DO EGM96 COM<br>MALHA DE 5km .....     | 62 |
| FIGURA 4.3 ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDA DO EGM96 COM<br>MALHA DE 10km ..... | 63 |
| FIGURA 4.4 ONDULAÇÃO GEOIDAL OBTIDA DO EGM96 COM<br>MALHA DE 10km .....    | 64 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 4.5 ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDA DO EGM96 COM<br>MALHA DE 15km ..... | 65 |
| FIGURA 4.6 ONDULAÇÃO GEOIDAL OBTIDA DO EGM96 COM<br>MALHA DE 15km .....    | 66 |
| FIGURA 4.7 ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDA DO EGM96 COM<br>MALHA DE 20km ..... | 67 |
| FIGURA 4.8 ONDULAÇÃO GEOIDAL OBTIDA DO EGM96 COM<br>MALHA DE 20km .....    | 68 |
| FIGURA 4.9 ERRO NA CORREÇÃO DE AR-LIVRE PELO SEGUNDO<br>TERMO .....        | 70 |
| FIGURA 4.10 ERRO NO PLATÔ DE BOUGUER DEVIDO À DENSIDADE                    | 72 |
| FIGURA 4.11 ERRO NO PLATÔ DE BOUGUER EM RELAÇÃO<br>À ALTITUDE .....        | 73 |
| FIGURA 4.12 ERRO NO PLATÔ DE BOUGUER EM RELAÇÃO<br>À DENSIDADE .....       | 74 |
| FIGURA 4.13 DIFERENÇAS NA CORREÇÃO DO TERRENO<br>DEVIDO A DENSIDADE .....  | 76 |
| FIGURA 4.14 GRÁFICO DA CORREÇÃO DO TERRENO .....                           | 77 |
| FIGURA 4.15 GRÁFICO DAS ALTITUDES DOS DADOS<br>GRAVIMÉTRICOS .....         | 78 |
| FIGURA 4.16 DIFERENÇAS NA ANOMALIA BOUGUER DEVIDO A<br>DENSIDADE .....     | 79 |
| FIGURA 4.17 ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS DE AR-LIVRE<br>OBSERVADAS .....        | 81 |
| FIGURA 4.18 REDE NEURAL PROBABILISTICA (RNP) .....                         | 82 |
| FIGURA 4.19 VARIAÇÃO LATERAL DE DENSIDADE .....                            | 83 |
| FIGURA 4.20 PONTOS USADOS NO TREINAMENTO .....                             | 86 |
| FIGURA 4.21 ARQUITETURA DA RNA [4 5 1] DA REGIÃO<br>DOS ANDES .....        | 87 |
| FIGURA 4.22 PERFORMANCE DAS RNAs DAS TRÊS REGIÕES<br>PARA AR-LIVRE .....   | 88 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 4.23 ARQUITETURA DA RNA [5 5 1] DA REGIÃO<br>DOS ANDES .....      | 94  |
| FIGURA 4.24 PERFORMANCE DAS RNAMs DAS TRÊS REGIÕES<br>PARA BOUGUER ..... | 95  |
| FIGURA 4.25 ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS RESIDUAIS .....                      | 103 |
| FIGURA 4.26 EFEITO INDIRETO DO METODO DE CONDENSAÇÃO<br>DE HELMERT ..... | 106 |
| FIGURA 5.1 MAPA GEOIDAL LOCAL FINAL .....                                | 124 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 3.1 VALORES DE DENSIDADE MÉDIA .....   | 50 |
| TABELA 3.2 DADOS DE CONTROLE DAS ANOMALIAS DE<br>AR-LIVRE E BOUGUER .....                             | 53 |
| TABELA 3.3 DADOS DE CONTROLE ABSOLUTO GPS/RNs, NO EQUADOR   | 55 |
| TABELA 3.4 DADOS DE CONTROLE RELATIVO GPS/RNs, NO EQUADOR ..  | 58 |
| TABELA 4.1 DIFERENÇAS NA ONDULAÇÃO GEOIDAL .....  | 60 |
| TABELA 4.2 DIFERENÇAS DA VALIDAÇÃO RELATIVA DA<br>ONDULAÇÃO GEOIDAL .....                             | 60 |
| TABELA 4.3 VALORES DE ANOMALIA AR-LIVRE E ONDULAÇÕES<br>GEOIDAIS EM INTERVALOS DE 5 km x 5 km .....   | 62 |
| TABELA 4.4 VALORES DE ANOMALIA AR-LIVRE E ONDULAÇÕES<br>GEOIDAIS EM INTERVALOS DE 10 km x 10 km ..... | 64 |
| TABELA 4.5 VALORES DE ANOMALIA AR-LIVRE E ONDULAÇÕES<br>GEOIDAIS EM INTERVALOS DE 15 km x 15 km ..... | 66 |
| TABELA 4.6 VALORES DE ANOMALIA AR-LIVRE E ONDULAÇÕES<br>GEOIDAIS EM INTERVALOS DE 20 km x 20 km ..... | 68 |
| TABELA 4.7 CLASSIFICAÇÃO DAS DENSIDADES EM CLASSES .....  | 71 |
| TABELA 4.8 DIFERENÇAS NO PLATÔ DE BOUGUER DEVIDO À<br>DENSIDADE .....                                 | 74 |
| TABELA 4.9 RESULTADOS DAS CORREÇÕES DO TERRENO .....  | 76 |
| TABELA 4.10 DIFERENÇAS NA ANOMALIA DE BOUGUER DEVIDO A<br>DENSIDADE .....                             | 79 |
| TABELA 4.11 VALORES DA BASE DE DADOS GRAVIMÉTRICOS<br>TERRESTRES .....                                | 80 |
| TABELA 4.12 VALORES DO ARQUIVO DE ANOMALIAS DE AR-LIVRE .....   | 80 |
| TABELA 4.13 DIFERENÇA NA REGIÃO DO LITORAL PARA AR-LIVRE  | 90 |
| TABELA 4.14 DIFERENÇA NA REGIÃO ANDINA PARA AR-LIVRE .....  | 91 |
| TABELA 4.15 DIFERENÇA NA REGIÃO AMAZÔNICA PARA AR-LIVRE .....   | 91 |

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 4.16 DIFERENÇAS NA ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDAS COM<br>AS RNAM NA REGIÃO TOTAL .....         | 92  |
| TABELA 4.17 DIFERENÇA NA REGIÃO DO LITORAL PARA BOUGUER. ....                                       | 96  |
| TABELA 4.18 DIFERENÇA NA REGIÃO ANDINA PARA BOUGUER .....   | 96  |
| TABELA 4.19 DIFERENÇA NA REGIÃO AMAZÔNICA PARA BOUGUER .....  | 97  |
| TABELA 4.20 DIFERENÇAS NA ANOMALIA DE BOUGUER OBTIDAS<br>COM AS RNAM NA REGIÃO TOTAL .....          | 97  |
| TABELA 4.21 DIFERENÇA NA REGIÃO DO LITORAL .....  | 98  |
| TABELA 4.22 DIFERENÇA NA REGIÃO ANDINA .....  | 98  |
| TABELA 4.23 DIFERENÇA NA REGIÃO AMAZÔNICA .....   | 99  |
| TABELA 4.24 DIFERENÇAS NA ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDAS A<br>PARTIR DE BOUGUER NA REGIÃO TOTAL ..... | 99  |
| TABELA 4.25 DIFERENÇAS DAS ANOMALIAS DE AR-LIVRE OBTIDAS<br>COM O MÉTODO DE KRIGING .....           | 101 |
| TABELA 4.26 RESULTADOS DAS ANOMALIAS DE AR-LIVRE .....  | 102 |
| TABELA 4.27 RESULTADOS DAS ANOMALIAS RESIDUAIS .....  | 104 |
| TABELA 4.28 ANOMALIAS RESIDUAIS COM O PROCESSO<br>ALIVRE-RNAM .....                                 | 104 |
| TABELA 4.29 ANOMALIAS RESIDUAIS COM O PROCESSO<br>ALIVRE-BOU-RNAM .....                             | 104 |
| TABELA 4.30 ONDULAÇÕES RESIDUAIS NOS PONTOS DE CONTROLE<br>COM O PROCESSO ALIVRE-RNAM .....         | 105 |
| TABELA 4.31 ONDULAÇÕES RESIDUAIS NOS PONTOS DE CONTROLE<br>COM O PROCESSO ALIVRE-BOU-RNAM .....     | 105 |
| TABELA 4.32 RESULTADOS DA ONDULAÇÃO GEOIDAL DO PROCESSO<br>ALIVRE-RNAM .....                        | 107 |
| TABELA 4.33 RESULTADOS DA ONDULAÇÃO GEOIDAL DO PROCESSO<br>ALIVRE-BOU-RNAM .....                    | 108 |
| TABELA 5.1 DIFERENÇAS DAS ONDULAÇÕES GEOIDAIS PARA<br>O MODELO 1 .....                              | 111 |
| TABELA 5.2 DIFERENÇAS DAS ONDULAÇÕES GEOIDAIS PARA<br>O MODELO 2 .....                              | 112 |



|   |     |
|---|-----|
| TABELA 5.3 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO1 PARA MALHA DE 5km              | 114 |
| TABELA 5.4 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO1 PARA MALHA DE 10km             | 115 |
| TABELA 5.5 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO1 PARA MALHA DE 15km             | 116 |
| TABELA 5.6 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO1 PARA MALHA DE 20km             | 117 |
| TABELA 5.7 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO 2 PARA MALHA DE 5km             | 118 |
| TABELA 5.8 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO2 PARA MALHA DE 10km             | 119 |
| TABELA 5.9 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO2 PARA MALHA DE 15km             | 120 |
| TABELA 5.10 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO2 PARA MALHA DE 20km            | 121 |
| TABELA 5.11 RESUMO DA AVALIAÇÃO REALIZADA NOS MODELOS<br>GEOIDAIS ..... | 122 |

## LISTA DAS PRINCIPAIS SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| BDG     | Base de Dados Gravimétricos                        |
| CEI     | Comunidade de Estados Independentes                |
| EGM96   | Earth Gravitational Model 1996                     |
| GPS     | Global Positioning System                          |
| GRS80   | Geodetic Reference System 1980                     |
| GTOPO30 | Global Topographic Model, resolução 30"            |
| IAG     | International Association of Geodesy               |
| IGM     | Instituto Geográfico Militar del Ecuador           |
| IGSN71  | International Gravity Standardization Net 1971     |
| IGAC    | Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia   |
| MEM     | Ministerio de Energía y Minas del Ecuador          |
| MDD     | Modelo Digital de Variação Lateral de Densidade    |
| MDT     | Modelo Digital do Terreno                          |
| EQM     | Erro Quadrático Médio                              |
| PVCG    | Problema de Valor de Contorno da Geodésia          |
| NAVSTAR | Navigation System with Time and Ranging            |
| SRTM    | Shuttle Radar Topography Mission                   |
| RBF     | Radial Basis Function                              |
| RNA     | Rede Neural Artificial                             |
| RNAM    | Rede Neural Artificial Multicamada                 |
| RNP     | Rede Neural Probabilística                         |
| RRNN    | Referência de Nível                                |
| SQE     | Soma dos Quadrados dos Erros                       |
| SGGSA   | Subcomissão de Gravidade e Geóide para Sul América |
| USP     | Universidade São Paulo                             |
| WGS84   | World Geodetic System 1984                         |

## RESUMO

Na determinação das ondulações geoidais a anomalia da gravidade é uma das grandezas importantes da solução do problema do valor de contorno da Geodésia Física. O uso da Integral de Stokes pressupõe a determinação do valor da gravidade na totalidade da superfície terrestre. Na prática, os valores são obtidos para uma determinada área, em forma discreta, ao longo de estradas e em intervalos irregulares. Conseqüentemente, a existência de grandes áreas sem dados é comum, especialmente naquelas de muita vegetação ou nas altas montanhas onde o acesso é difícil.

O objetivo desta pesquisa é gerar malhas de anomalias gravimétricas a partir de dados esparsos com a finalidade de calcular o modelo geoidal local, limitada pelos paralelos  $0,5^{\circ}$  e  $-4^{\circ}$  e meridianos  $-75^{\circ}$  e  $-81^{\circ}$ , mediante a integração de dados heterogêneos.

A técnica principal utilizada para a geração da malha de anomalias gravimétricas foi mediante o uso de Redes Neurais Artificiais, do tipo Multicamada e de Funções de Base Radial, que foram treinadas com os dados disponíveis. Com as redes neurais treinadas foram geradas malhas de anomalias de ar-livre, e de Bouguer e a partir desta foi calculada sua correspondente anomalia de ar-livre, com intervalo de espaçamento de 5km x 5km, 10km x 10km, 15km x 15km, 20km x 20km.

Para o cálculo do geóide local foi utilizada a técnica “remover-restaurar”, usando uma combinação adequada do modelo geopotencial EGM96, anomalias gravimétricas, dados topográficos contidos no modelo topográfico digital GTOPO30, valores de densidade obtidos a partir do modelo digital de variação lateral de densidades. Foram geradas 2 modelos geoidais locais, usando as malhas de anomalias anteriores e com o mesmos intervalos de espaçamento. Os modelos passaram por uma avaliação absoluta e relativa, baseada em dados obtidos com GPS e nivelamento, e foi escolhido aquele modelo que forneceu os melhores resultados. O modelo geoidal escolhido, foi obtido a partir da malha de 5km x 5km, da anomalia de ar-livre gerada em forma direta com a Rede Neural Artificial do tipo Multicamada, apresentando uma precisão absoluta de 0,67 m e uma precisão relativa de 3ppm.

## RESUMEN

En el cálculo de las ondulaciones geoidales, la anomalía de gravedad es una de las componentes más importantes para la solución del problema de valor de contorno de la Geodesia Física. Para poder utilizar la integral de Stokes es necesario que se conozca los valores de la gravedad en forma continua y en toda la superficie de la Tierra. En la práctica, estos valores son obtenidos en una determinada área, en forma discreta e irregular, realizados especialmente a lo largo de las carreteras o en los ríos. Ocasionalmente, que existan áreas en donde no se dispone de ninguna información gravimétrica debido fundamentalmente por la inaccesibilidad a las zonas montañosas o a las zonas de mucha vegetación.

El objetivo de esta investigación es generar mallas de anomalías gravimétricas a partir de datos dispersos con el fin de determinar el modelo geoidal local en el área comprendida entre los paralelos  $0,5^\circ$  e  $-4^\circ$  y entre los meridianos  $-75^\circ$  e  $-81^\circ$ , mediante la integración de datos heterogéneos.

La principal técnica utilizada para la generación de las mallas de anomalías gravimétricas fue mediante el uso de las Redes Neuronales Artificiales del tipo Multicapa e de Funciones de Base Radial, que fueron entrenadas con los datos que estaban disponibles. Con las redes neuronales entrenadas, fueron generadas las mallas de anomalías de aire-libre, y las de Bouguer con su respectiva anomalía de aire-libre, en intervalos de  $5\text{km} \times 5\text{km}$ ,  $10\text{km} \times 10\text{km}$ ,  $15\text{km} \times 15\text{km}$ ,  $20\text{km} \times 20\text{km}$ .

Para el cálculo del geoide local fue usada la técnica "remove-restore", mediante la combinación del modelo geopotencial EGM96, anomalías gravimétricas, datos topográficos obtenidos del modelo digital topográfico GTOPO30 y valores de densidad determinados a partir del modelo digital de variación lateral de densidades. Fueron generados 2 modelos geoidales locales para cada intervalo. Los modelos calculados fueron evaluados en forma absoluta y relativa mediante la comparación con los datos obtenidos con GPS e nivelación. El modelo geoidal local escogido y que dió los mejores resultados, fue el obtenido a partir de la malla de la anomalía de aire-libre de  $5\text{km} \times 5\text{km}$ , y que fue generada en forma directa con la Red Neuronal Artificial de tipo Multicapa. La precisión absoluta obtenida con este modelo escogido fue de  $0,65\text{ m}$ , y la precisión relativa fue de  $3\text{ppm}$ .

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Com o lançamento do primeiro satélite, o SPUTNIK I pela antiga URSS, a tecnologia espacial teve um rápido desenvolvimento, mais ainda com o acompanhamento da informática e eletrônica. Estas se transformaram em ferramentas fortes para muitos campos da ciência e da engenharia, como é o caso das Ciências Geodésicas.

Nos últimos anos, a procura para determinar o Geóide Global tem sido objeto de muitas pesquisas em quase todos os países do mundo e, em especial, nos países da América do Sul. No entanto, estes estudos na atualidade só podem gerar modelos locais ou regionais em vista da definição particular do Datum Vertical em cada país, assim como o estabelecimento das redes de nivelamento. Portanto, um Geóide Local estará referido a uma superfície equipotencial particular tendo um geopotencial constante. Em geral, esta superfície vai ter um afastamento vertical com respeito ao Geóide Global.

Em particular, um propósito desta pesquisa é o de fundamentar e subsidiar os trabalhos destinados a determinar uma superfície única para América do Sul com o fim de estabelecer um sistema único de referência para as redes altimétricas no continente. Isto decorre principalmente devido ao emprego de sistemas de posicionamento por satélites artificiais como o GPS - NAVSTAR, tanto para fins práticos como científicos. Assim, o conhecimento do geóide tornou-se uma necessidade básica na Geodésia atual.

O GPS - NAVSTAR fornece três coordenadas cartesianas (X,Y,Z) referidas a um sistema de referência cuja origem é o geocentro; mas também via transformações pode-se obter coordenadas geodésicas ( $\phi, \lambda, h$ ) respectivamente a latitude, longitude e altitude geométrica (ou elipsoidal). Porém, para muitos fins, o que se necessita é a altitude "ortométrica" (referida ao Geóide) e não a geométrica (referida ao elipsóide). Assim é necessário o conhecimento da ondulação geoidal para poder explorar numa forma mais eficiente e com eficácia o posicionamento por satélites.

Os Modelos Geopotenciais Globais têm-se apresentado como a melhor

solução global para o referencial vertical unificado, e têm sido usados em aplicações onde as ondulações geoidais com uma precisão de  $\pm 1$  m ou melhor são necessárias (LEIMONE et al., 1998). Em aplicações onde precisa-se maior precisão é necessário usar outras informações como os dados gravimétricos, topográficos, geológicos.

Atualmente, os métodos empregados na determinação das ondulações geoidais são:

- Modelos do Geopotencial: Faz uso dos coeficientes do modelo Geopotencial (RAPP, 1994).
- Gravimétrico: Faz uma combinação de modelos geopotenciais, anomalias gravimétricas e dados topográficos contidos em um Modelo Digital do Terreno (MDT) (SUBIZA, 2000).
- Por Satélites Artificiais: Utiliza as observações obtidas mediante a realização do posicionamento por satélites (e.g. GPS) em referências de nível (RRNN) (ARANA, 2000).

Para o cálculo dos valores das ondulações geoidais são geralmente usadas as técnicas: Colocação por Mínimos Quadrados (TSCHERNING, 1994); Integração Numérica (FORSBERG, 1994); Transformada Rápida de Fourier (SIDERIS, 1994). Estas informações e os programas foram fornecidos pela Escola do Geoide.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A procura de uma superfície de referência global para altitudes com significado físico (Geóide) tem sido, e continuará sendo, uma tarefa fundamental que atualmente a maioria dos países estão desenvolvendo, com objetivo de integrá-lo com outras tecnologias, tanto para fins práticos quanto científicos.

No caso da Geodésia, o conhecimento do Geóide é fundamental para o posicionamento global por satélites artificiais (GPS). Em certas regiões onde não se conhece o Geóide com uma boa precisão, se usam os Modelos Geopotenciais, como é o caso do EGM96 (Earth Geopotential Model 1996). Na área de estudo, com uso deste modelo pode-se chegar a diferenças na ondulação geoidal de até 3 m, não atendendo certas necessidades desejadas em trabalhos práticos, principalmente quando a necessidade de acurácia é melhor que 1 m. Com a

finalidade de realizar uma boa compatibilização entre as altitudes obtidas com o GPS e as definidas pelo datum vertical local, faz-se necessário melhorar o conhecimento do Geóide.

Na determinação das ondulações geoidais a anomalia da gravidade é uma das componentes importantes da solução do problema do valor de contorno na Geodésia Física. O uso da Integral de Stokes pressupõe a determinação do valor da gravidade na totalidade da superfície terrestre. Na prática, os valores de gravidade são obtidos em uma determinada área, em forma discreta, geralmente ao longo das estradas e em intervalos irregulares. Conseqüentemente, a existência de grandes áreas sem dados é comum, especialmente naquelas de muita vegetação ou nas altas montanhas onde a acessibilidade é difícil. Outro problema existe quando se quer determinar o Geóide Local de um país, pois são necessárias observações dos países vizinhos, mas estas estão em diferentes referenciais tanto verticais como horizontais. Para minimizar os efeitos causados, as observações são reduzidas ao mesmo referencial que no caso deste trabalho será o WGS84.

Uma solução seria fazer uma maior densificação gravimétrica mediante novos levantamentos terrestres, aéreos ou orbitais para cobrir essas áreas vazias. Mas isso implicaria num maior custo e tempo.

A questão principal é: como podem ser usados os dados gravimétricos disponíveis com o fim de melhorar a precisão do Geóide Local com dados esparsos?

Neste trabalho se pesquisa uma metodologia na qual combinem-se, tanto dados heterogêneos provenientes de diversas fontes. No presente caso foram oriundos dos levantamentos gravimétricos, do modelo geopotencial EGM96, do modelo digital do terreno GTOPO30 (*Global Topographic*, sendo 30" o espaçamento da grade), do modelo digital de variação lateral de densidades (MDD). Foram utilizadas técnicas de cálculo como Stokes, Remover-Restaurar e Rede Neural Artificial (RNA), com a finalidade de melhorar a precisão das anomalias gravimétricas na geração da malha para a obtenção das ondulações do geóide local. Para tanto foi utilizada uma área teste no Equador, a qual apresenta topografia bastante diferenciada, assim como heterogeneidades laterais da crosta bastante significativas.

### 1.3 OBJETIVOS

Neste trabalho, o objetivo geral consiste em explorar a integração de diferentes dados heterogêneos para gerar a malha de anomalias gravimétricas. A meta é otimizar a obtenção de Geóide Gravimétrico Local, a partir de dados gravimétricos irregularmente espaçados e com pouca densidade de pontos, com dados obtidos, no presente estudo, a partir do modelo geopotencial EGM96, dados gravimétricos, do modelo digital de elevações GTOPO30, do modelo digital de variação lateral de densidades (MDD). Para a predição das anomalias gravimétricas são usadas técnicas de aprendizagem baseadas no treinamento de Redes Neurais Artificiais (RNA). Para o cálculo das ondulações geoidais é usada a técnica conhecida como “remover-restaurar” ou decomposição da altura geoidal em diferentes comprimentos de onda, através da qual as ondulações geoidais residuais são determinadas com base em anomalias de gravidade também residuais mediante a integração numérica da integral de Stokes na forma esférica.

O cálculo do modelo geoidal local é focado no Equador na região situada entre os paralelos  $0,5^\circ$  e  $-4^\circ$  e meridianos  $-75^\circ$  e  $-81^\circ$ . Visando a avaliação dos resultados, as ondulações geoidais obtidas neste trabalho foram comparadas com as obtidas com GPS e nivelamento.

### 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Para uma melhor compreensão, este trabalho está dividido em 6 capítulos. No capítulo 2 são apresentados os aspectos conceituais fundamentais nos quais se baseia esta pesquisa. No capítulo 3 faz-se uma descrição dos dados disponíveis. No capítulo 4 é detalhada a metodologia empregada e os testes realizados no processo de treinamento da rede neural artificial, a qual foi empregada na geração do modelo digital de variação lateral de densidades, assim como, para a predição das anomalias gravimétricas de Ar Livre e de Bouguer. Também, são mostrados os resultados obtidos na geração da malha e no cálculo das ondulações geoidais. No capítulo 5 é mostrada a avaliação feita nos modelos geoidais calculados mediante o uso dos dados de controle disponíveis. Finalmente, no capítulo 6, são fornecidas as conclusões e recomendações das etapas realizadas neste trabalho assim como algumas sugestões para trabalhos futuros a serem realizados.



## 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos usados neste trabalho. Consiste em duas seções principais: Na primeira seção, são definidos os potenciais gravitacional, gravífico, centrífugo e o potencial anômalo ou perturbador. Também, são apresentadas as reduções gravimétricas e a determinação das anomalias de gravidade. Posteriormente, mostra-se a formulação da técnica “remover-restaurar” (decomposição da altura geoidal) para contornar as limitações na aplicação prática da fórmula de Stokes e poder calcular as alturas geoidais. Na segunda seção são definidas Rede Neural Artificial, arquiteturas das redes neurais, treinamento, e fundamentalmente, são apresentadas as redes neurais artificiais do tipo multicamadas e as redes neurais com função de base radial usadas para determinar as anomalias gravimétricas de ar-livre e de Bouguer com a finalidade de gerar as malhas gravimétricas, assim como para gerar a malha da variação lateral de densidades. As malhas gravimétricas geradas com as redes neurais artificiais são usadas posteriormente na integração numérica com a fórmula de Stokes.

### 2.1 POTENCIAL DA GRAVIDADE REAL

A Teoria do Potencial se constitui em poderosa ferramenta para o tratamento matemático de problemas relacionados, por exemplo, na eletricidade, no electromagnetismo, na gravitação, etc.. Sua aplicação no estudo do campo da gravidade terrestre, baseia-se no fato de que, sob condições particulares, este campo vetorial pode ser tratado como um campo escalar. Além disso, um tipo especial de funções, as funções harmônicas, são soluções da equação de Laplace. Tais condições verificam-se no caso das funções que modelam o potencial gravitacional e o potencial anômalo (GEMAEL, 1999).

Na Geodésia, a determinação das ondulações geodais vincula-se ao Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG), que assemelha-se ao terceiro problema de contorno da Teoria do Potencial. No PVCG é efetivada uma combinação linear do potencial perturbador e sua derivada normal sobre uma superfície. Determina-se a função que assume os valores observados sobre a superfície e que é harmônica no exterior das massas.

A solução de Stokes usa anomalias de gravidade para obter as alturas do geóide (distância ao longo da normal, entre a superfície elipsoidal e a superfície geoidal) e é a estratégia de cálculo que será usada neste trabalho.

A força específica (por unidade de massa) que atua sobre um corpo em repouso sobre a superfície terrestre, resultante da força gravitacional específica ( $\vec{F}$ ) (que representa a atração das massas terrestres) e da força centrífuga específica ( $\vec{C}$ ) (devido à rotação da Terra) é denominada de **força de gravidade** ( $\vec{g}$ ), e dada por:

$$\vec{g} = \vec{F} + \vec{C} \quad (2.1)$$

A magnitude do vetor gravidade poder ser obtida através de determinações relativas ou absolutas mediante o uso dos gravímetros. A unidade de medida da gravidade é usualmente o Gal, sendo expresso pela relação:

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$$

As superfícies sobre as quais o potencial de gravidade da Terra real ou Geopotencial ( $W$ ) é constante, são denominadas superfícies equipotenciais. O Geóide é uma superfície equipotencial representada como  $W_0$ , a qual é muito próxima ao nível médio dos mares quando este encontra-se em repouso ou em equilíbrio. O vetor gravidade representa o gradiente do potencial de gravidade, sendo perpendicular às superfícies equipotencias. O geopotencial é definido pela composição do potencial de atração ( $V$ ) e do potencial centrífugo ( $\Phi$ ) (HEISKANEN & MORITZ, 1967, p. 47), (TORGUE, 1983, p.36), e num sistema de coordenadas cartesianas, pode ser representado pela expressão:

$$W(X,Y,Z) = V(X,Y,Z) + \Phi(X,Y,0) \quad (2.2)$$

sendo  $V$  dado por:

$$V(X,Y,Z) = G \iiint_V \frac{\rho(x',y',z')}{l} dx' dy' dz' \quad (2.3)$$

onde:

$l$  é a distância entre o elemento de massa atrativa e o ponto atraído;

$dx'dy'dz' = dv$  é o elemento de volume da massa atrativa;

$\rho$  é a densidade da massa atrativa;

$G$  é a constante gravitacional universal;

$v$  indica que a integração é feita na totalidade do volume da massa atrativa

E  $\Phi$ , dado por:

$$\Phi(X, Y, 0) = \frac{1}{2} \omega^2 (X^2 + Y^2) \quad (2.4)$$

onde:

$\omega$  é a velocidade angular de rotação da Terra.

Aplicando o operador gradiente à (2.2), obtém-se o vetor de gravidade, isto é:

$$\vec{g} = \text{grad } (W) \quad (2.5)$$

Num sistema cartesiano tem-se:

$$\vec{g} = \frac{\partial W}{\partial X} \vec{i} + \frac{\partial W}{\partial Y} \vec{j} + \frac{\partial W}{\partial Z} \vec{k} \quad (2.6)$$

Aplicando o operador de Laplace ( $\Delta$ ) ao potencial gravitacional  $V$  (equação 2.3) no exterior da superfície terrestre, obtém-se que  $\Delta V = 0$ , isto é,  $V$  é uma função harmônica, e pode ser expresso através do desenvolvimento em harmônicos esféricos, no ponto de coordenadas polares (distância geocêntrica  $r$ , co-latitute geocêntrica  $\theta$ , e longitude  $\lambda$ ) (RAPP, 1994, p. 73) por:

$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=-n}^n C_{nm} \bar{Y}_{nm}(\theta, \lambda) \right] \quad (2.7)$$

onde:

$GM$  é a constante gravitacional geocêntrica;

$a$  é o semi-eixo maior do elipsóide de referência;

$C_{nm}$  são os coeficientes plenamente normalizados de grau  $n$  e ordem  $m$ , do potencial gravitacional desenvolvido em harmônicos esféricos;

$\bar{Y}_{nm}$  são os harmônicos esféricos de superfície plenamente normalizados. Onde:

$$\bar{Y}_{nm}(\theta, \lambda) = \overline{P_{n|m|}}(\cos \theta) \begin{cases} \cos m\lambda, & \text{para } m \geq 0 \\ \sin |m|\lambda, & \text{para } m < 0 \end{cases},$$

sendo que  $\overline{P_{n|m|}}$  são as funções associadas de Legendre plenamente normalizadas de grau  $n$  e ordem  $m$ .

O potencial centrífugo também expresso mediante as coordenadas polares  $r$ ,  $\theta$ , resulta:

$$\Phi = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta \quad (2.8)$$

### 2.1.1 Potencial de Gravidade Normal

A Terra, dentro de uma certa aproximação denominada de Terra Normal, pode ser considerada como se fosse um elipsóide de revolução, cujo centro coincide com o geocentro, o semi-eixo menor com o eixo de rotação terrestre, e que tem a

mesma massa e velocidade angular de rotação da Terra real. A sua superfície é considerada como uma superfície equipotencial do campo de gravidade normal ( $U_0$ ) e igual ao valor do potencial sobre a superfície geoidal ( $W_0$ ). O potencial de gravidade normal  $U$  ou esferopotencial é definido por:

$$U = Z + \Phi \quad (2.9)$$

onde:

$Z$  é o potencial gravitacional do elipsóide

$\Phi$  é o potencial de rotação e igual a equação (2.8)

Como o potencial gravitacional ( $Z$ ) no exterior das massas satisfaz a equação de Laplace  $\Delta Z = 0$ , então pode ser representado por harmônicos esféricos, ficando o esferopotencial ( $U$ ) da forma (GEMAEL, 1999, p. 81):

$$U = \left( \frac{GM}{r} \right) \left[ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left( \frac{a}{r} \right)^{2n} P_{2n}(\theta) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta \quad (2.10)$$

onde  $J_{2n}$  são os coeficientes zonais pares, obtidos pela fórmula:

$$J_{2n} = (-1)^{n+1} \left[ 1 - n + \frac{5n(C - A)}{Mc^2} \right] \frac{3e^{2n}}{(2n+1)(2n+3)} \quad (2.11)$$

sendo:

$c$  a semidistância focal ;

$e$  a excentricidade principal do elipsóide;

$A, C$  os momentos de inércia da Terra em relação aos eixos X e Z, respectivamente;

$M$  a massa da Terra (incluída a massa atmosférica).

Aplicando o operador gradiente a  $U$  (equação 2.9), tem-se o vetor gravidade normal

$$\vec{\gamma} = \text{grad}(U) \quad (2.12)$$

A magnitude deste vetor é denominada de gravidade normal  $\gamma$ , cujo valor sobre a superfície do elipsóide é dado pela fórmula de Somigliana (TORGUE, 1989, p. 37), (LEMOINE, et al., 1998, p. 5-12):

$$\gamma = \gamma_e \frac{1 + k \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (2.13)$$

com

$$k = \frac{b \gamma_p}{a \gamma_e} - 1 \quad (2.14)$$

onde:

- $\gamma_e$  é a gravidade normal no Equador;
- $\gamma_p$  é a gravidade normal no pólo;
- $a, b$  são os semi-eixos do elipsóide;
- $e$  é a excentricidade principal do elipsóide;
- $\phi$  é a latitude do ponto sobre o elipsóide.

sendo:

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (2.15)$$

e  $f$  o achatamento do elipsóide de referência, igual a:

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (2.16)$$

### 2.1.2 Potencial Perturbador ou Anômalo

O potencial normal ou esferopotencial ( $U$ ) é uma boa aproximação do potencial da gravidade real ou geopotencial ( $W$ ). O potencial anômalo é decorrente da influência de massas anômalas tanto da crosta como do manto terrestre. A diferença entre o geopotencial e o esferopotencial em um mesmo ponto, é denominada de Potencial Perturbador ou Anômalo ( $T$ ) e dado em um ponto P por:

$$T_P = W_P - U_P \quad (2.17)$$

Tanto o geopotencial ( $W_P$ ) quanto o esferopotencial ( $U_P$ ) tem o mesmo potencial centrífugo  $\Phi_P$ , logo,  $T_P$  é também a diferença entre os potenciais gravitacionais, na forma:

$$T_P = V_P - Z_P \quad (2.18)$$

E como ambas são funções harmônicas fora da superfície terrestre, então  $T_P$  é também harmônico e satisfaz a equação de Laplace, isto é:

$$\Delta T_P = 0 \quad (2.19)$$

Em razão de satisfazer a equação (2.19),  $T_P$  pode ser expresso em harmônicos esféricos (LEMOINE, et al., 1998, p. 5-10) por:

$$T_P(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=-n}^n \bar{C}_{nm} \bar{Y}_{nm}(\theta, \lambda) \quad (2.20)$$

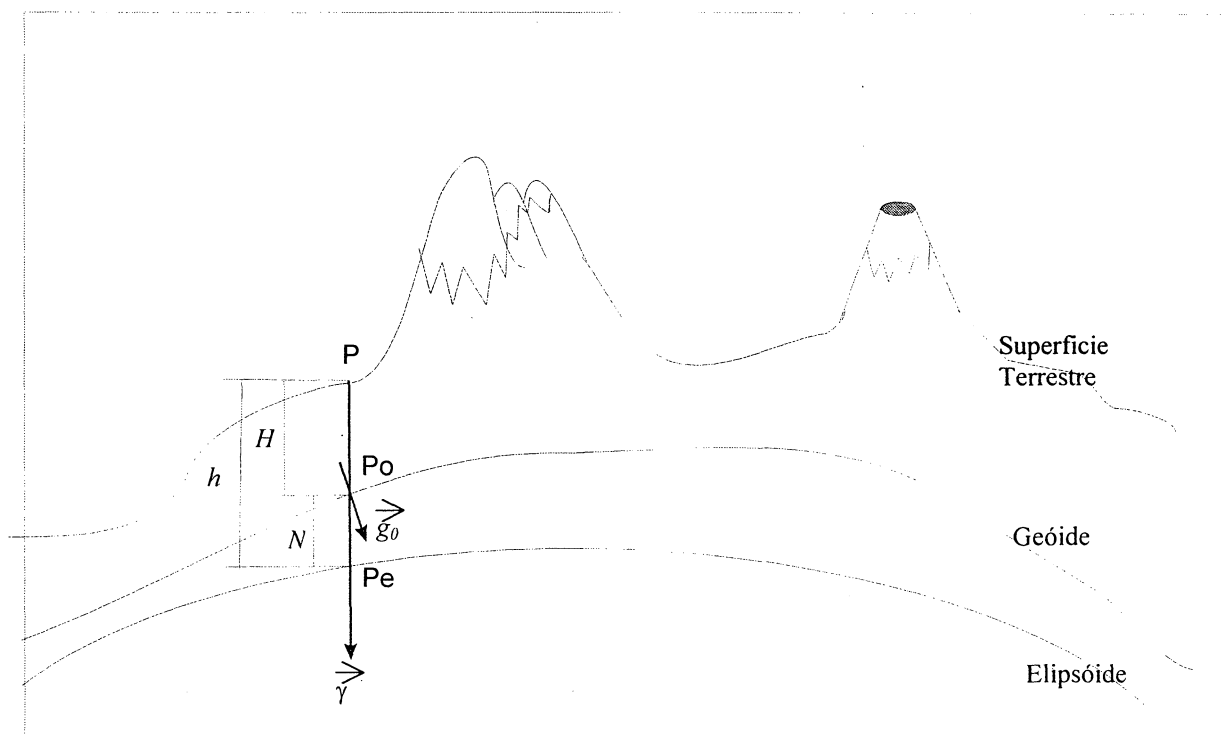
Os coeficientes do potencial anômalo  $\bar{C}_{nm}$ , são calculados subtraíndo-se os coeficientes do potencial gravitacional normal  $\bar{C}^Z$ , dos coeficientes do mesmo grau do potencial gravitacional  $\bar{C}^V$ . Assim por exemplo (SUBIZA, 2000, p. 8):

$$\begin{aligned}\bar{C}_{n0}^T &= \bar{C}_{n0}^V - \bar{C}_{n0}^Z, \text{ para } m = 0, \text{ e } n \leq \text{grau máximo em } Z; \\ \bar{C}_{n0}^T &= \bar{C}_{n0}^V, \text{ para } m = 0, \text{ e } n > \text{grau máximo em } Z; \\ \bar{C}_{nm}^T &= \bar{C}_{nm}^V \text{ para } m \neq 0.\end{aligned}$$

### 2.1.3 Anomalias da Gravidade

A anomalia da gravidade é definida como a diferença entre a gravidade real ( $g_0$ ) em  $P_0$  (no Geóide) e a gravidade normal ( $\gamma$ ) calculada em  $P_e$  (no elipsóide de referência), conforme a figura 2.1. A distância existente entre o geóide e o elipsóide é conhecida como ondulação geoidal ou altura geoidal ( $N$ )

FIGURA 2.1 - ANOMALIA DA GRAVIDADE



O valor da anomalia da gravidade é calculado por (HEINSKANEN & MORITZ, 1967, p.83), (GEMAEL, 1999, p.134):

$$\Delta g = g_0 - \gamma \quad (2.21)$$



Esta grandeza representa os afastamentos da gravidade real no nível do geóide em relação à gravidade teórica no nível do elipsóide. É fundamental como elemento de relacionamento entre estas superfícies. O maior problema associado à determinação da anomalia da gravidade é o da obtenção do valor de  $g_0$  uma vez que a gravidade é observada na superfície física da Terra.

Como a Terra normal inclui a massa total atmosférica, é necessário fazer a correção atmosférica  $\delta g_A$  aos valores da gravidade observada ( $g^{obs}$ ) sobre a superfície terrestre. A atmosfera é incorporada para que seja consistente com a necessidade de não ter massas externas a Terra na solução do PVCG. Tal correção é dada por (LEMOINE, et. al., 1998, p.3-13):

$$\delta g_A = 0.87 e^{-0.116 H n^{1.047}} \quad (2.22)$$

onde :

$Hn$  é a altitude nivelada (em m) do ponto de observação com respeito ao nível médio dos mares. Este valor é usado uma vez que a altitude ortométrica  $H$  não é conhecida.

Deve-se observar que segundo alguns autores (e.g. SJÖBERG, 1998; SUBIZA, 2000, SJÖBERG & NAHAVANDCHI, 2000), esta correção pode gerar um efeito sistemático na determinação das alturas geoidais nos cálculos de modelos geoidais locais ou regionais. Este efeito é causado pelo truncamento da fórmula de Stokes a um determinado raio de integração, variando segundo SJÖBERG (1998) entre 3,17 m e -2,23 m. Segundo SUBIZA (2000, p.15) para um raio aproximado de  $7^\circ$ , o erro nas alturas geoidais calculadas seria de -0,32 m.

Fazendo a correção pela equação (2.22), tem-se:

$$g = g^{obs} + \delta g_A \quad (2.23)$$

### 2.1.4 A Fórmula de Stokes

O problema do Valor de Contorno da Geodésia (PVCG), se baseia na determinação do potencial perturbador mediante o conhecimento das anomalias da gravidade que, observadas sobre a superfície geoidal ou reduzidas a esta, constituem os valores observados  $\Delta g$  da Equação Fundamental da Geodésia Física:

$$\frac{\partial T}{\partial h} - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial h} T + \Delta g = 0 \quad (2.24)$$

onde:

$T$  é o potencial anômalo;

$\frac{\partial T}{\partial h}$  é a derivada normal do potencial anômalo ao longo da normal ao elipsóide;

$\gamma$  é a gravidade normal;

$h$  é a altitude elipsoidal;

$\frac{\partial \gamma}{\partial h}$  é o gradiente vertical da gravidade normal referida ao elipsóide de referência;

$\Delta g$  é a anomalia de gravidade.

Como  $\Delta g$  é determinado sobre uma superfície (e.g. geóide), a equação diferencial (2.24) pode ser usada somente como condição de contorno. O problema de contorno referente à separação geóide – elipsóide pode ser tratado através da solução de Stokes (equação 2.29).

Observando a figura 2.1, tem-se que:

$$U_{p_0} = U_{p_e} + \left( \frac{\partial U}{\partial n} \right) N = U_{p_e} - \gamma N \quad (2.25)$$

Assim, da equação (2.17) e (2.25), tem-se:

$$W_{P_0} = U_{P_0} + T_{P_0} = U_{P_e} - \gamma N + T_{P_0} \quad (2.25a)$$

como  $W_{P_0} = U_{P_e} = W_0$ , então:

$$T = \gamma N \quad (2.25b)$$

e

$$N = \frac{T}{\gamma} \quad (2.25c)$$

A equação (2.25c) é denominada como *fórmula de Bruns*, e relaciona a ondulação geoidal (  $N$  ) com o potencial perturbador (  $T$ , sobre o geóide ), através da gravidade normal (  $\gamma$ , sobre o elipsóide ).

Geralmente, para a determinação da ondulação geoidal o elipsóide é substituído por uma aproximação esférica e, considerando que sobre a esfera  $\partial/\partial h = \partial/\partial r$ , a equação (2.24) pode ser apresentada como:

$$-\Delta g = \frac{2T}{r} + \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.26)$$

O potencial perturbador  $T(R, \theta, \lambda)$  quando  $r=R$ , quer dizer sobre o geóide, é calculado (HEINSKANEN & MORITZ, 1967, p.93) por:

$$T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g S(\Psi) d\sigma \quad (2.27)$$

onde  $\sigma$  indica que a integração é feita para toda a terra.

Sendo,  $S(\Psi)$  a função ou núcleo (Kernel) de Stokes e é calculada de forma rigorosa para qualquer  $\Psi$  (distância angular sobre a superfície esférica, entre o ponto atrativo e o ponto atraído) pela expressão :

$$S(\Psi) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2n+1}{n-1} P_n(\Psi) = \frac{1}{\sin \frac{\Psi}{2}} - 6 \sin \frac{\Psi}{2} + 1 - 5 \cos \Psi - 3 \cos \Psi \ln \left( \sin \frac{\Psi}{2} + \sin^2 \frac{\Psi}{2} \right) \quad (2.28)$$

onde,  $P_n(\Psi)$  são polinômios de Legendre de enésimo grau em  $\Psi$  (TORQUE, 1983).

Aplicando a equação (2.25) tem-se :

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g S(\Psi) d\sigma \quad (2.29)$$

Tanto a equação (2.27) quanto a (2.29) são conhecidas como fórmulas de Stokes. A fórmula (2.29) permite calcular a ondulação do geóide a partir de dados gravimétricos.

Como  $T$  é harmônico fora da superfície do geóide, significa que todas as massas acima do geóide devem ser removidas, eliminadas ou condensadas mediante reduções gravimétricas. A integração deve ser feita em toda a superfície da Terra. Para tanto, deve-se dispor de informações gravimétricas com distribuição adequada em todo o planeta .

A determinação de Stokes elimina os termos harmônicos de grau zero e um em  $T$  e  $N$  devido ao fato de que assume-se que o esferopotencial sobre o elipsóide é numericamente igual ao geopotencial sobre o geóide, que as massas são iguais e que seu centro coincide com o centro de massas da Terra.

Usando coordenadas geodésicas  $\phi$  e  $\lambda$  a equação (2.29) pode ser escrita como (GEMAEL, 1999, p. 146):

$$N(\phi, \lambda) = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \Delta g'(\phi', \lambda') S(\Psi) \cos \phi' d\phi' d\lambda' \quad (2.30)$$

sendo  $(\phi', \lambda')$  as coordenadas do elemento de área associado à anomalia  $\Delta g'$ .

### 2.1.5 Reduções Gravimétricas

As reduções gravimétricas são necessárias para a solução do problema do valor de contorno para a determinação do geóide mediante a aplicação da fórmula de Stokes (conforme a seção 2.1.4). Para tanto é requerido que as anomalias da gravidade representem os valores sobre o geóide. Então, não somente as observações da gravidade devem ser reduzidas ao geóide, mas também não deve existir efeito de massas externas a ele.

A redução a ser escolhida deve pressupor ( HEISKANEN & MORITZ, 1967, p. 290): um significado geofísico; simplicidade no cálculo; viabilidade para a interpolação; e uma redução ou eliminação do denominado efeito indireto (conforme a equação 2.31, na seqüência). Em princípio, todas as reduções gravimétricas são equivalentes e devem resultar no mesmo geóide se elas são aplicadas adequadamente e se o efeito indireto for considerado.

#### 2.1.5.1 O efeito indireto

O processo de redução gravimétrica das massas externas ao geóide dá origem ao chamado *Efeito Indireto* ( $N_{ind}$ ) sobre o potencial. Este efeito é resultante da modificação do valor original do potencial ocorrida pela condensação destas no interior do geóide. Como consequência, este efeito vai causar mudança na localização do geóide. Isto implica que a superfície que se calcula a partir da fórmula de Stokes, não é mais o geóide, e sim outra superfície ligeiramente diferente, conhecida como co-geóide. A separação ( $N_{ind}$ ) entre o geóide e o co-geóide é dada pela aplicação da fórmula de Bruns à diferença do potencial  $\delta W$  (MARTINEC & VANICEK, 1994, p. 214), ou seja

$$N_{ind} = \frac{\delta W}{\gamma} \quad (2.31)$$

A diferença do potencial  $\delta W$  dependerá da redução gravimétrica usada. Então, a cada redução gravimétrica corresponde um co-geóide diferente.

Também, a variação sofrida pelo potencial implica em uma alteração no valor de gravidade reduzida ao geóide, pelo que, antes da aplicação da fórmula de Stokes, as anomalias devem ser reduzidas ao co-geóide mediante uma redução de ar-livre sobre  $N_{ind}$  (PESSOA, 1997, p. 66) ou seja:

$$\delta \Delta g = \frac{\partial g}{\partial h} N_{ind} \cong \frac{\partial \gamma}{\partial h} = 0.3086 N_{ind} \quad (2.32)$$

onde,  $\delta \Delta g$  é conhecida como efeito indireto sobre a gravidade e seus valores em geral são da ordem do mGal.

Aplicando a fórmula de Stokes com a anomalia resultante, obtém-se a altura com respeito ao co-geóide ( $N^C$ ). Para obter a altura geoidal tem-se que restaurar o efeito indireto ( $N_{ind}$ ) na altura geoidal causada pela redução gravimétrica, ficando:

$$N = N^C + N_{ind} \quad (2.33)$$

#### 2.1.5.2 Reduções de Ar livre e de Bouguer

A redução do valor da gravidade de uma estação com altitude "ortométrica"  $H$ , para o geóide é feita mediante a redução (ou correção) de ar livre ( $C_{AL}$ ), (Torgue, 1989, p. 89) e dada por:

$$C_{AL} = -\frac{\partial g}{\partial H} H \quad (2.34)$$

sendo  $\partial g/\partial H$  o gradiente vertical da gravidade da Terra real; devido a seu não conhecimento, usa-se o gradiente da gravidade normal ( $\partial \gamma/\partial h$ ), e em vez de  $H$ , a altitude nivelada  $Hn$  (em metros), obtendo  $C_{AL}$  em miligal da seguinte forma:

$$C_{AL} \cong -\left[ \left( \frac{\partial \gamma}{\partial h} \right) Hn + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 \gamma}{\partial h^2} \right) Hn^2 \right] \quad (2.35)$$

sendo:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial h} = -\frac{2\gamma}{a} \left( 1 + f - 2f \sin^2 \phi + \frac{3}{2} f^2 - 2f^2 \sin^2 \phi + \frac{1}{2} f^2 \sin^4 \phi \right) - 2\varpi^2 \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial^2 \gamma}{\partial h^2} = \frac{6\gamma}{a^2 (1 - f \sin^2 \phi)^2} \quad (2.37)$$

A anomalia de ar livre ( $\Delta g_{AL}$ ) é a resultante obtida depois da aplicação da correção de "ar livre"  $C_{AL}$ , ao valor da gravidade ( $g$ ) para reduzi-la ao geóide.

$$\Delta g_{AL} = g + C_{AL} - \gamma \quad (2.38)$$

A redução de ar livre considera somente o efeito da diferença da altitude entre o ponto de observação e o geóide, e não faz consideração nenhuma a respeito da densidade das massas entre eles.

Para eliminar a influência das massas deve ser aplicada outra redução, conhecida como redução (ou correção) de Bouguer. Segundo GEMAEL (1999), a correção de Bouguer corresponde à remoção das massas topográficas que encontram-se acima do geóide. A anomalia de Bouguer ( $\Delta g_B$ ) é a resultante obtida depois da aplicação da correção de Bouguer ao valor da anomalia de ar livre, que é dada de forma analítica por:

$$\Delta g_B = \Delta g_{AL} - 2\pi G \bar{\rho} Hn - B + C_T \quad (2.39)$$

onde:

$\Delta g_{AL}$  é a anomalia de ar livre;

$2\pi G \bar{\rho} Hn$  é a componente vertical de atração (Correção de Bouguer) exercida pelo platô horizontal (ou de Bouguer) estendida até o infinito, de altitude  $Hn$  e densidade média constante  $\bar{\rho}$ ;

$B$  é a correção do platô de Bouguer para a calota da mesma espessura, até uma distância de 166,735 Km;

$C_T$  é a correção do terreno (ou efeito direto da topografia), em relação à calota até uma distância de 166,735 Km.

Geralmente, a correção do platô de Bouguer é feita com  $\bar{\rho} = 2,67 \text{ g/cm}^3$ . Mas, em regiões montanhosas pode existir uma variação da densidade, que eventualmente chega até a 20%. Como o objetivo é aumentar a precisão do geóide local se faz indispensável considerar esta variação. A mesma pode ser obtida a partir de informação geológica, geofísica, ou de outras fontes. O valor médio da densidade  $\bar{\rho}$  (ver figura 2.2) é calculado pela fórmula:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{nc} \rho_i P_i}{Hn} \quad (2.40)$$

onde :

$\rho_i$  é o valor da densidade da camada geológica  $i$ ;

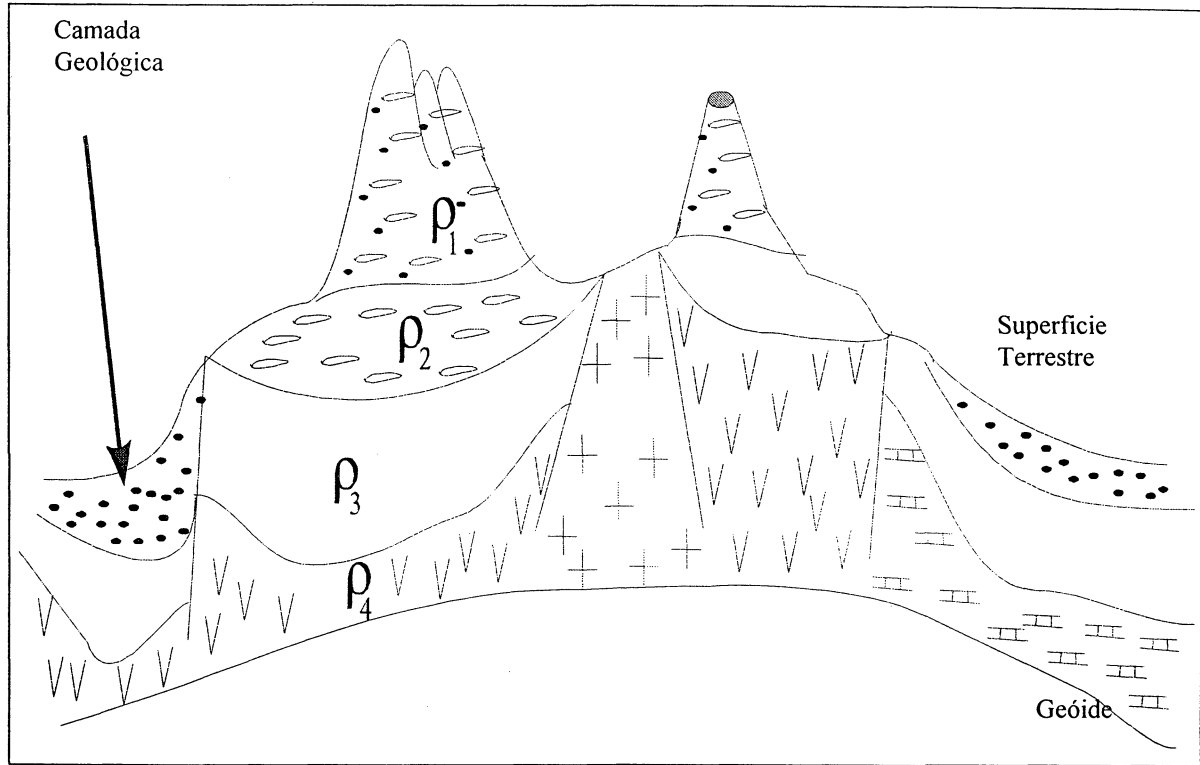
$P_i$  é a espessura média da camada geológica  $i$ ;

$nc$  é o número de camadas geológicas.

Observação: A camada inferior tem sua espessura limitada pela altitude (nivelada ou estimada) média do seu topo.



FIGURA 2.2 CAMADAS GEOLÓGICAS



O termo  $B$  (equação 2.39) pode ser calculado mediante a fórmula (VANICEK, et al., 2001, p.212):

$$B = -8 \pi G \bar{\rho} \frac{H n^2}{R} \quad (2.41)$$

Segundo FORSBERG (1994, p.118), a correção esférica ( $B$ ) também pode ser evitada quando se calcula a correção do terreno mediante integração numérica por prismas, tal como a técnica usada neste trabalho. Esta correção considera as irregularidades das massas topográficas relativas ao platô de Bouguer. Em coordenadas cartesianas esta correção é dada por:

$$C_T = G \iiint_{\tau} \int_{z=Hn_{(p)}}^{z=Hn} \frac{\bar{\rho} (z - Hn_{(p)})}{[(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + (Hn_{(p)} - z)^2]^{3/2}} dx dy dz \quad (2.42)$$

onde:

- $\tau$  indica o domínio de integração;
- $Hn_{(P)}$  é a altitude do ponto  $P$  onde vai ser feito o cálculo;
- $Hn$  é a altitude do ponto móvel (ponto que se desloca a longo de  $\sigma$ );
- $x, y, z$  são as coordenadas do ponto móvel;
- $x_P, y_P$  são as coordenadas do ponto  $P$ .

### 2.1.5.3 Condensação de Helmert

A redução ou condensação de Helmert, não elimina as massas topográficas; ela as condensa sobre a superfície do geóide formando uma superfície material de densidade superficial  $k = \bar{\rho} Hn$ . Desta forma, a massa total da Terra não sofre alteração, e o efeito indireto é pequeno. A condensação de Helmert corresponde à redução isostática no sistema Pratt-Hayford quando a profundidade de compensação tende para zero (HEINSKANEN & MORITZ, 1967), (GEMAEL, 1999), (PACINO, 1999). As etapas a serem seguidas são:

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Remoção das massas acima do geóide         | $-2\pi G \bar{\rho} Hn$ |
| Redução ao geóide via correção de ar-livre | $C_{AL}$                |
| Correção do terreno                        | $C_T$                   |
| Restauração das massas condensadas         | $2\pi G \bar{\rho} Hn$  |

A anomalia de gravidade resultante da condensação de Helmert obtida sobre o co-geóide é:

$$\Delta g_{CH} = \Delta g_{AL} + C_T + \delta \Delta g \quad (2.43)$$

### 2.1.6 Técnica Remove-Restore

O uso da equação (2.27) ou (2.29), pressupõe o conhecimento das anomalias em toda a superfície geoidal, numa forma contínua. Na prática, o que se

tem são dados em forma discreta e irregular sobre parte da superfície terrestre. Assim, algumas modificações devem ser feitas para aplicar a integral na forma correta. Em primeiro lugar, a integral é substituída por um somatório discreto. Em segundo lugar, ela é aplicada sobre uma área restrita porque os longos comprimentos de onda são eliminados mediante o modelo geopotencial. Segundo SIDERIS & SHE (1995, p.93), esta técnica consiste em:

a) Calcular as contribuições tanto na anomalia gravimétrica quanto na altura geoidal a partir de um modelo geopotencial ( $MG$ ) para um ponto  $P(\phi, \lambda)$  mediante a expressão em harmônicos esféricos da seguinte forma:

$$\Delta g_{MG} = \bar{g} \sum_{n=2}^{n_{m\acute{a}x}} (n-1) \sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda_p) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda_p)] \bar{P}_{nm}(\sin\phi_p) \quad (2.44)$$

$$N_{MG} = R \sum_{n=2}^{n_{m\acute{a}x}} \sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda_p) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda_p)] \bar{P}_{nm}(\sin\phi_p) \quad (2.45)$$

onde:

|                              |  |
|------------------------------|--|
| $\bar{g}$                    | é a gravidade média da Terra;  |
| $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ | são os coeficientes do geopotencial plenamente normalizadas, e é a mesma que na equação (2.20), com diferente notação; |
| $R$                          | é o raio médio da Terra;   |
| $\bar{P}_{nm}$               | são as funções de Legendre plenamente normalizadas;  |
| $n_{m\acute{a}x}$            | é o máximo grau do modelo do geopotencial.   |

O cálculo da contribuição do modelo geopotencial nas anomalias gravimétricas e na altura geoidal é feito através do programa **gravt\_gm** (SIDERIS, 1994, apud Escola do Geóide, IAG/IBGE, 1997) que implementa as equações (2.44) e (2.45).

b) Remover a contribuição do modelo geopotencial à anomalia resultante da condensação de Helmert, obtendo a anomalia de gravidade residual ( $\Delta g_{res}$ )

$$\Delta g_{res} = \Delta g_{CH} - \Delta g_{MG} \quad (2.46)$$

Substituindo a equação (2.43) em (2.46), resulta:

$$\Delta g_{res} = \Delta g_{AL} + C_T + \delta \Delta g - \Delta g_{MG} \quad (2.47)$$

c) Calcular o efeito indireto do terreno no geóide devido à condensação de Helmert. Para este cálculo foi usado o programa **ind** (SIDERIS, 1997, apud Escola do Geoide, 1997). A fórmula implementada no programa é:

$$\begin{aligned} N_{ind} = & -\frac{\pi G \bar{\rho} H n_{(P)}^2}{\gamma} + \frac{G \bar{\rho}}{\gamma} \left[ \iint_{\sigma} \frac{Hn - Hn_{(P)}}{l_0} dx dy - \iint_{\sigma} \frac{Hn - Hn_{(P)}}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy \right] \\ & - \frac{G \bar{\rho}}{6\gamma} \left[ \iint_{\sigma} \frac{Hn^3 - Hn_{(P)}^3}{l_0^3} dx dy \right] + \frac{\pi G \bar{\rho} H_m^2}{2\gamma} \left[ \iint_{\sigma} \frac{Hn - Hn_{(P)}}{l_0^3} dx dy \right] \end{aligned} \quad (2.48)$$

onde:

$Hn_{(P)}$ ,  $Hn$  são altitudes do pontos de cálculo e do móvel, respectivamente;

$H_m$  é a altitude média da área de cálculo.

com:

$$l_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + H_m^2} \quad (2.49)$$

d) Calcular a altura geoidal residual de um ponto P usando Stokes, que em coordenadas geográficas é expressa em forma explícita como:

$$N_{res}^C(\phi, \lambda) = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \Delta g_{res}(\phi', \lambda') S(\phi, \lambda, \phi', \lambda') \cos \phi' d\phi' d\lambda' \quad (2.50)$$

onde :

$S(\phi, \lambda, \phi', \lambda')$  é o núcleo de Stokes como na equação (2.28)

com

$$\text{sen}^2\left(\frac{\Psi}{2}\right) = \text{sen}^2\left(\frac{\delta\phi}{2}\right) + \text{sen}^2\left(\frac{\delta\lambda}{2}\right) \cos\phi \cos\phi' \quad (2.51)$$

e

$$\delta\phi = \phi - \phi', \quad \delta\lambda = \lambda - \lambda'$$

e) Restaurar as contribuições da altura geoidal tanto do modelo geopotencial quanto do efeito indireto do terreno, na forma:

$$N = N_{MG} + N_{res}^C + N_{ind} \quad (2.52)$$

## 2.2 REDE NEURAL ARTIFICIAL

Esta seção é uma introdução às técnicas das Redes Neurais Artificiais (RNAs), e principalmente, as RNAs supervisionadas do tipo Multicamada e de Função de Base Radial, que são utilizadas para a realização da malha do modelo digital de variação lateral de densidades e das anomalias de gravidade de ar-livre e de Bouguer.

As redes neurais artificiais (RNA) surgiram da observação do funcionamento do cérebro humano e da comparação deste com o trabalho dos computadores digitais. Entretanto, mesmo com a capacidade dos computadores de executar milhões de operações por segundo, o cérebro humano pode executar certas tarefas de forma muito mais eficiente do que os computadores. A razão é que o cérebro humano realiza os cálculos em forma paralela eficientemente, já que milhares ou milhões de neurônios são ativados simultaneamente para resolver um mesmo problema.

O cérebro humano pode ser considerado como um computador extremamente sofisticado e um dos maiores desafios é o do entendimento de como ele realiza o processamento de informações. Ele tem cerca de cem bilhões de neurônios. Cada neurônio recebe entradas provenientes de centenas de dendritos e da mesma forma envia sinais de saída a centenas de ramais através de seu axônio.

No momento do nascimento, o cérebro já têm grande parte de sua estrutura formada. E o mais importante é que têm mecanismos e habilidades para desenvolver suas próprias regras através do que usualmente se denomina como “experiência”. A experiência vai sendo acumulada com o tempo, sendo que o maior desenvolvimento acontece nos dois primeiros anos de vida, nos quais se formam em torno de um milhão de sinapses por segundo.

Pode-se dizer que o cérebro humano é uma estrutura complexa, não linear e paralela para o tratamento da informação que armazena conhecimento nas conexões que existem entre os elementos de processamento - os neurônios (HAYKIN, 2001, p. 28), (MUÑOZ, 1996, p. 105). Esta definição mostra o paralelismo que existe entre a estrutura cerebral biológica e as redes neurais artificiais.

LOESCH & SARI (1996, p.5) definem uma RNA como um sistema computacional que imita habilidades do sistema nervoso biológico mediante o uso de um número de neurônios artificiais interconectados.

As RNAs foram desenvolvidas, originalmente, na década de 40, pelo neurofisiologista Warren McCulloch e pelo matemático Walter Pitts, os quais fizeram uma analogia entre células nervosas vivas e o processo eletrônico (HAYKIN, 1999). Desde então, novos estudos foram feitos como os de: Donald Hebb em 1949 o qual aborda “A organização do comportamento”; de Marvin Minsky em 1951 o qual constrói o primeiro neurocomputador porém sem nenhuma aplicação prática; em 1957 e 1958 Frank Rosenblatt e outros, constróem o primeiro neurocomputador com aplicação prática para o reconhecimento de padrões; em 1960, Bernard Widrow Marcian Hoff desenvolveu o ADALINE (**AD**Aptive **LI**Near **E**lements, ou elementos lineares adaptativos (FILIPPETTO, 2001).

Em 1962, Widrow propôs uma das primeiras redes neurais com diferentes camadas treináveis com múltiplos elementos adaptativos, mais conhecido como MADALINE (**M**ultiple **AD**Aptive **LI**Near **E**lements). Em 1965, Nilsson no seu livro “Learning Machines”, discorre sobre padrões linearmente separáveis por hiper

superfícies. Mas, em 1969, com a publicação “Perceptrons” de Minsky e Papert que provam que um perceptron não pode resolver problemas linearmente não separáveis, como no caso da função XOR (problema do OU Exclusivo), foi produzido um declínio no interesse dos pesquisadores sobre RNA por volta da década 70. A partir da década 80, novamente começa a se fazer pesquisas sobre a RNA, especialmente com a descoberta de um método efetivo e geral de treinamento de uma RNA de múltiplas camadas, proposto por David Rumerhalt e James McClelland em 1986 (HAYKIN, 2001).

Desde então, diversos modelos de redes neurais artificiais têm surgido com o propósito de aperfeiçoar e aplicar esta tecnologia nos diferentes campos da ciência.

### 2.2.1 Vantagens da RNA

As RNA devem a sua capacidade de processamento da informação à sua estrutura maciçamente distribuída de forma paralela e à sua habilidade de aprender, e portanto generalizar. A generalização se refere ao fato da rede neural produzir saídas adequadas para entradas que não estavam presentes durante o treinamento (aprendizagem). Algumas das características relevantes principais e as qualidades das RNAs, se tornam atraentes para sua aplicação (HAYKIN, 2001), (MUÑOZ, 1996), principalmente no estudo de nosso particular interesse, a predição de anomalias gravimétricas. Estas características são:

1. **Habilidade de tratar sistemas não lineares:** Um neurônio artificial pode ser linear ou não-linear. Uma rede neural, constituída por conexões de neurônios não-lineares é ela mesma não-linear. Além disso, a não-linearidade é de um tipo especial, no sentido de ela ser distribuída por toda a rede. Esta característica é relevante nas aplicações em identificação de sistemas dinâmicos, classificação de padrões, aproximador funcional.
2. **Tolerância a falhas:** O conhecimento é distribuído pela RNA, mais que em uma simples localização de memória. Uma parte das conexões pode estar inoperante, sem mudanças significativas no desempenho de toda a RNA.

3. **Adaptabilidade:** As redes neurais têm uma capacidade inata de adaptar seus pesos sinápticos a modificações do meio externo, ou seja, pode ser facilmente retreinada para lidar com pequenas modificações nas condições operativas do meio externo.
4. **Aprendizagem:** Uma RNA pode modificar seu comportamento em resposta ao meio externo. Quando é apresentado um conjunto de entradas, as RNAs se ajustam para gerar as respostas apropriadas.
5. **Generalização:** Consiste no mapeamento de entradas similares em saídas similares.
6. **Resposta a Evidências:** No contexto de aprendizagem supervisionada (para aproximação funcional e classificação), uma RNA pode, além de estimar a saída desejada, dar uma medida de confiabilidade de estimação.

### 2.2.2 Fundamentos de um Neurônio Biológico.

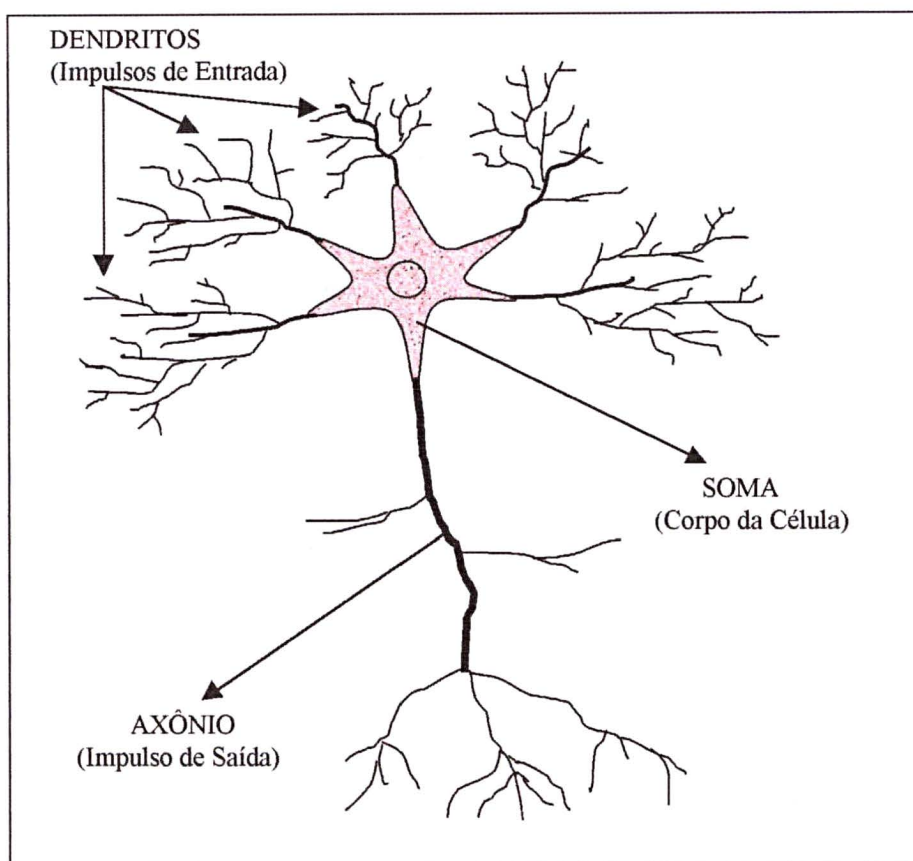
Tipicamente, um neurônio biológico é de cinco a seis ordens de grandeza mais lentos que as partes lógicas em silício; os eventos em um circuito de silício acontecem na ordem de  $10^{-9}$  segundos, enquanto que os eventos neurais acontecem na ordem de  $10^{-3}$  segundos. Entretanto, o cérebro compensa a taxa de operação relativamente lenta de um neurônio pelo número realmente grande de neurônios, com conexões maciças entre si.

O sistema nervoso recebe centenas ou milhares de informações dos diferentes receptores sensoriais que combinadas com as obtidas pela hereditariedade ou pelos mecanismos de aprendizagem, produz a resposta a ser dada e executada pelo corpo. O cérebro é uma parte do sistema nervoso que provê grande quantidade de controle sobre as funções do corpo.

Existem 2 tipos de células no cérebro: as “glia” responsáveis pelo suporte e nutrição, e os *neurônios* que são células especializadas à atividade nervosa. Existem diversos tipos de neurônios, com diferentes funções, dependendo da sua localização e estrutura morfológica, mas em geral constituem-se dos mesmos componentes básicos, como pode ser observado na figura 2.3.



FIGURA 2.3 - NEURÔNIO BIOLÓGICO



O corpo do neurônio ou soma, constituído do núcleo e pericário, dá o suporte metabólico a toda célula; a fibra nervosa ou axônio que é o prolongamento único e grande que aparece no soma, é responsável pela condução do impulso nervoso para o próximo neurônio; os dendritos que são prolongamentos menores em forma de ramificações (arborizações terminais) que emergem do pericário e do final do axônio, são, na maioria das vezes, responsáveis pela comunicação entre os neurônios através das sinapses.

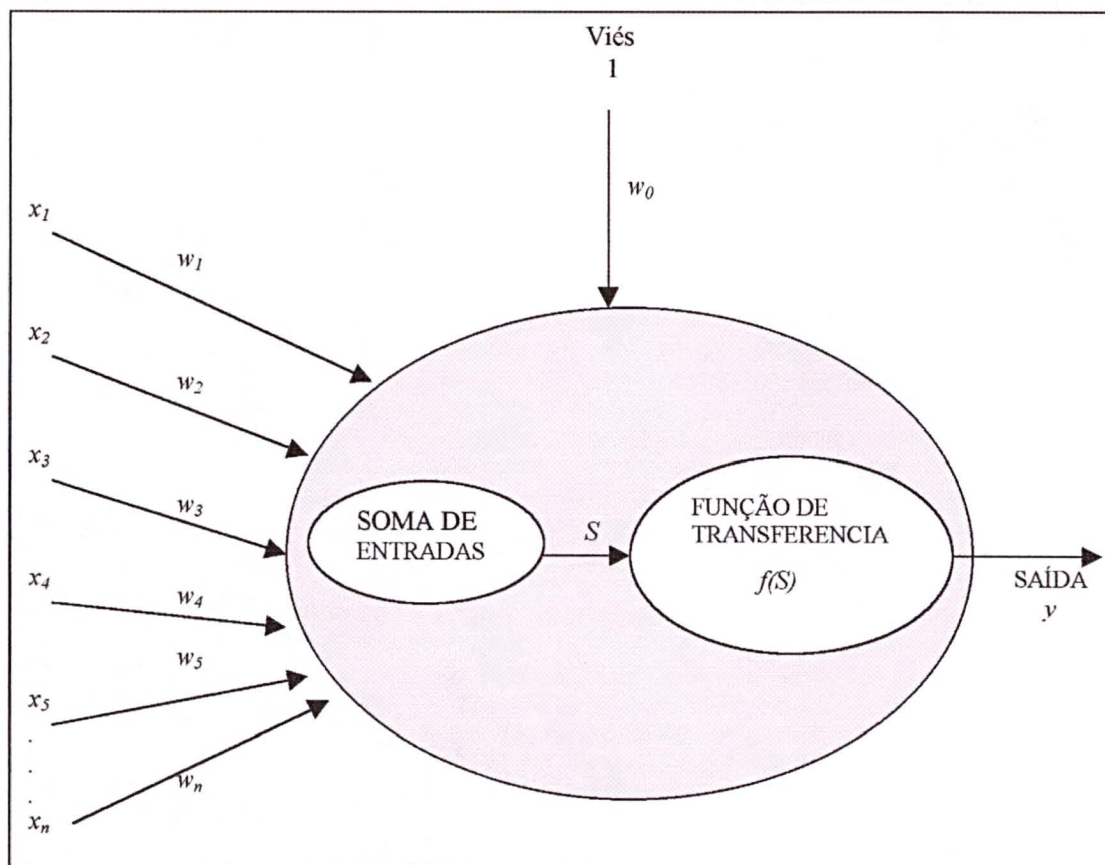
A sinapse é a estrutura dos neurônios através da qual ocorrem os processos de comunicação entre os mesmos, ou seja, onde ocorre a passagem do sinal neural (transmissão sináptica) através de processos eletroquímicos específicos. Em uma sinapse os neurônios não se tocam, permanecendo um espaço entre eles. Um neurônio pode receber ou enviar entre 1000 a 100000 conexões sinápticas em relação a outros neurônios, dependendo de seu tipo e localização no sistema nervoso.

Os dendritos atuam como entradas, recebendo a informação que depois é processada no soma. O resultado é transmitido através de seu axônio para os dendritos de outros neurônios, formando desta forma uma rede neural.

### 2.2.3 Característica de um Neurônio Artificial

Um neurônio artificial é uma estrutura lógico-matemática que procura simular a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico, como mostra a figura 2.4. Sendo assim, os dendritos são substituídos por *entradas*, cujas ligações com o corpo celular artificial são realizadas através de elementos chamados de *peso* (simulando as sinapses). Os estímulos captados pelas entradas são processados pela *função soma*, e o limiar de disparo do neurônio biológico é substituído pela *função de transferência* que permite restringir (limitar) o intervalo permissível de amplitude do sinal de saída a um valor finito. Numa RNA os neurônios também são conhecidos como nodos (GOSE, et al., 1996), (TVETER, 1998).

FIGURA 2.4 - PASSOS DE PROCESAMENTO DO NEURÔNIO ARTIFICIAL



O modelo neural da figura 2.4 inclui também um *viés* aplicado como parâmetro externo do neurônio artificial. O viés tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada efetiva da função de transferência ou função de ativação, dependendo se ele é positivo ou negativo, respectivamente (HAYKIN, 2001, p. 37). O viés é uma entrada adicional que pode ser acrescentada ao neurônio artificial, mas não provém de neurônio nenhum; seu valor é fixado em 1 e seu peso é ajustável como quaisquer dos demais pesos.

Os impulsos recebidos dos outros neurônios são ponderados usando os pesos  $w_i$  que desempenham o papel de simular a natureza inibitória ou excitatória das sinapses, reforçando ou dificultando a geração de um impulso. Em termos matemáticos, dentro de cada neurônio é calculada a interação entre as entradas e os pesos das conexões da seguinte forma (LI & BRIDGWATER, 1999, p. 67), (LOESCH & SARI. C, 1996, p. 28), (HAYKIN, 2001, p. 38).

$$S = \sum_{i=1}^n x_i w_i + w_0 \quad (2.53)$$

onde:

$x_i$  são as sinais de entrada;

$w_i$  são os pesos sinápticos provenientes dos neurônios da camada anterior

$w_0$  é o peso da entrada viés.

O resultado da equação (2.53) vai para a função de transferência  $f(S)$ , obtendo-se a saída  $y_k$  de acordo com a equação (2.54)

$$y_k = f(S) \quad (2.54)$$

### 2.2.3.1 Funções de transferência.

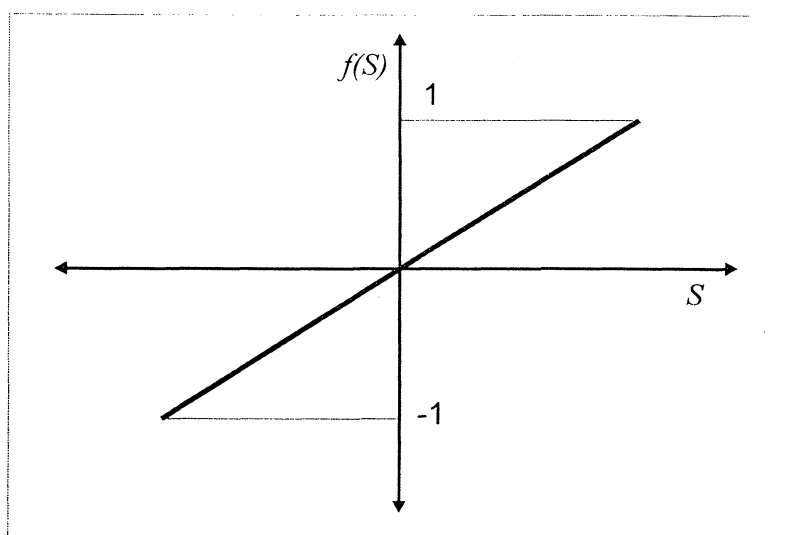
A função de transferência ou de ativação  $f(S)$  define a saída de um neurônio. Existem varias funções de transferência utilizadas nas RNAs, assim por exemplo tem-se a linear, sinal, sigmóide, base radial, competitiva, entre outras. Mas, devido que a diferenciabilidade é uma característica importante da teoria de redes neurais, isto é, a derivada deve existir, então a função de transferência tem que ser continua.

Aquí, identificam-se as funções contínuas de ativação ou transferência utilizadas neste trabalho:

A função de transferência Linear, como na figura 2.5, se estende de  $-1$  a  $+1$ , assumindo neste caso uma forma anti-simétrica em relação à origem. A função de ativação é expressa por:

$$f(S) = S \quad (2.55)$$

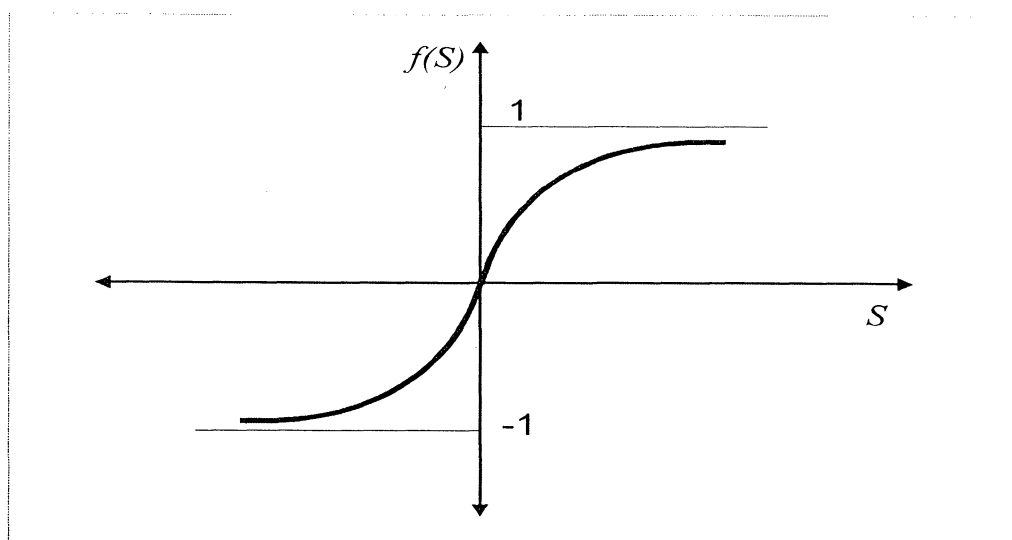
FIGURA 2.5. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA LINEAR



A função de transferência sigmóidal tangente hiperbólica, como na figura 2.6, é de longe a forma mais comum de função de ativação utilizada na construção de redes neurais artificiais. Ela é definida como uma função estritamente crescente que exibe um balanceamento adequado entre comportamento linear e não linear. A função é definida por:

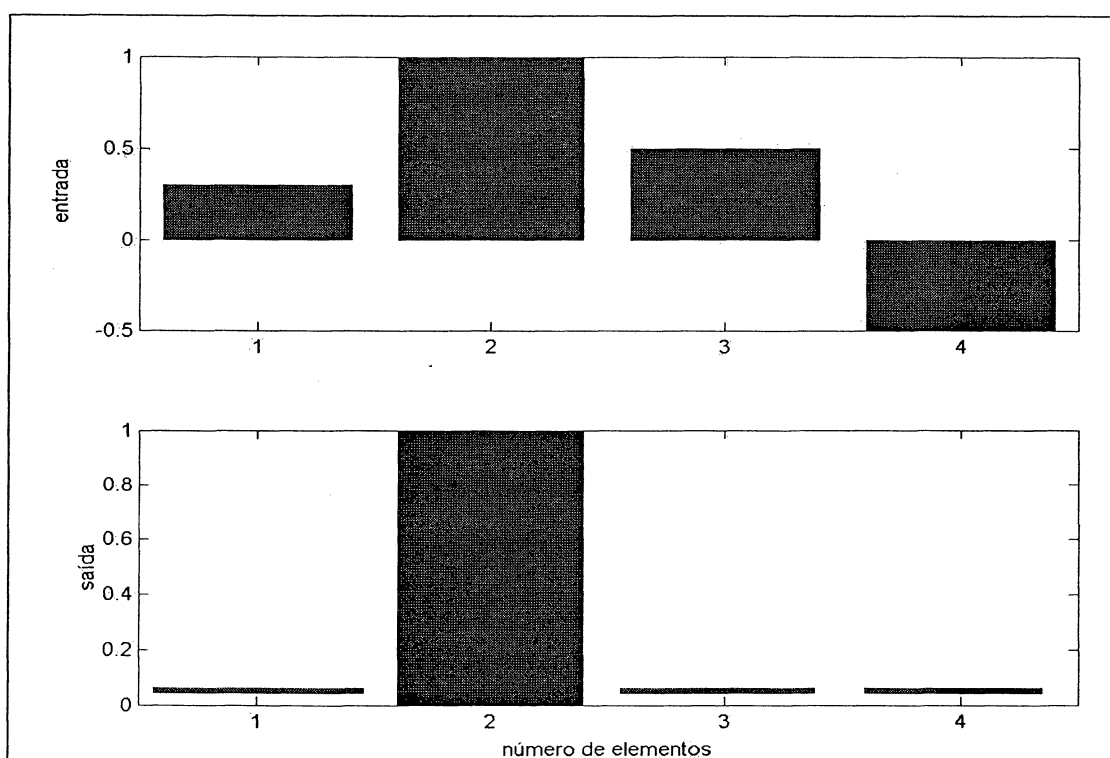
$$f(S) = \frac{e^S - e^{-S}}{e^S + e^{-S}} \quad (2.56)$$

FIGURA 2.6. FUNÇÃO DE TRANSFÊRENCIA SIGMOIDAL TANGENTE HIPERBOLICA



A função de transferência competitiva calcula vetores de saída a partir dos vetores de entrada e produz uma saída igual a 1 ao elemento que tem o maior valor na entrada, e zeros em outros casos. A figura 2.7 mostra o resultado da função competitiva.

FIGURA 2.7 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA COMPETITIVA



Esta função não tem derivada. É freqüentemente usada para problemas de classificação, pelo que foi utilizada neste trabalho para realizar a classificação de valores médios de densidades, conforme a seção 4.3.1.

A função de transferência de base radial que foi usada para predição de anomalias gravimétricas, é detalhada no item 2.2.7.

Conforme a maneira como os neurônios estão estruturados vai se ter diferentes arquiteturas ou topologias da rede, e estas são intimamente ligadas com o algoritmo de aprendizado utilizado para treiná-las.

#### 2.2.4 Arquitetura de uma RNA

Geralmente, uma Rede Neural Artificial (RNA) é constituída por um conjunto de elementos de processamento (EP) interconectados chamados de neurônios, organizados em uma ou mais camadas (POTUKUCHI & WEXLER, 1997, p. 744). A RNA tem a propensão natural para armazenar conhecimentos experimentais e torná-los disponíveis para uso. Parece-se com o cérebro em dois aspectos:

1. Conhecimento é adquirido pela rede através do processo de aprendizagem;
2. Os pesos das conexões entre neurônios, conhecidos como sinapses, são usados para armazenar o conhecimento.

Dependendo do arranjo dos neurônios, uma RNA pode ser estruturada com diferentes tipos de arquitetura. Segundo LOESCH & SARI (1996, p.24) podem ser classificadas como: Multicamadas, redes feedforward; camada simples, redes conectadas lateralmente; bicamadas, redes feedforward/feedback; multicamada, redes cooperativas; redes híbridas.

As conexões ou fluxo da informação entre grupos de neurônios podem ser feitas em forma lateral, para atrás (backward), para adiante (feedforward), ou conectar fazendo combinações com as anteriores.

### 2.2.5 Aprendizado da RNA

Uma propriedade muito importante das RNA é a sua habilidade de aprender a partir de seu ambiente, ou de melhorar o seu desempenho através da aprendizagem. Uma RNA aprende acerca do seu ambiente através de um processo interativo de ajustes aplicados a seus pesos sinápticos e níveis de viés. Há muitos processos de aprendizagem e podem ser classificados em dois grupos descritos a seguir:

Com presença de um “professor” ou “supervisor”, também denominado de processo de aprendizado supervisionado, na qual apresenta relacionamentos entre os padrões de entrada e saída, tanto sendo conhecidos os valores que formam as entradas quanto os valores que formam as saídas. Neste processo, cada entrada produz uma resposta de saída, que é comparada ao valor conhecido, e portanto estabelece o padrão desejado. Se a resposta real difere da desejada, a RNA gera um sinal de erro, que é usado para ir ajustando os pesos sinápticos da rede. O erro é então minimizado. As duas famílias de RNA supervisionadas com maior aceitação e maior desenvolvimento nos últimos anos, tem sido a RNA Multicamada (ver seção 2.2.6) e as RNA de Função de Base Radial (ver seção 2.2.7).

a) Sem a presença de um “professor” ou “supervisor”, também denominado de processo de aprendizado não supervisionado. Neste caso, apresenta-se a ausência de associações entre as entradas e saídas ou essas associações são desconhecidas, não existindo saídas desejadas para cada entrada. Durante a sessão de treinamento, a RNA recebe na entrada excitações muito diferentes e as organiza arbitrariamente em categorias.

b) Um conjunto de regras bem definidas para a solução de um problema de aprendizagem é denominado como *algoritmo de aprendizagem* (HAYKIN, 2001, p. 76). Várias são as regras de aprendizado utilizadas. Assim tem-se por exemplo: a regra de Hebb; a regra Delta, inspirada na regra de Hebb, também conhecida como regra de aprendizado Windrow-Holf ou “Least Mean Square” (LMS), tendo em vista que ela minimiza o erro médio quadrático; a regra por correção de erro.

O postulado de aprendizado de Hebb é a mais antiga das regras de aprendizagem. Hebb em 1940 citado por LOESCH & SARI (1996, p.15), demonstrou que a capacidade de aprendizagem das redes neurais pode ser conseguida através do ajuste dos pesos ( $w_i$ ) das conexões entre os neurônios. Ele propôs uma regra que diz que: Se dois neurônios em ambos os lados de uma sinapse (conexão) são ativados simultaneamente, então a força daquela sinapse é seletivamente aumentada.

#### 2.2.6 Rede Neural Multicamadas

A RNA multicamada (RNAM) é a estrutura de RNA desenvolvida na década de 80, e tem sido aplicada com sucesso para resolver diversos problemas, através do seu treinamento de forma supervisionada com um algoritmo conhecido como Retropropagação (Back-propagation).

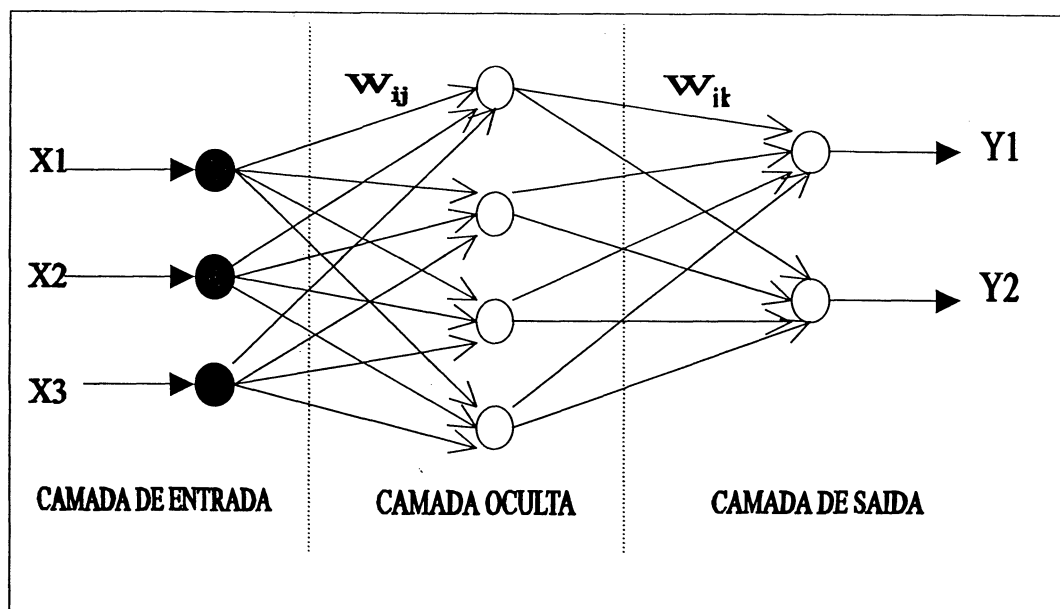
A RNAM é uma estrutura organizada em camadas (ver figura 2.8), e constituída por um conjunto de neurônios totalmente interconectados. Os neurônios de uma camada admitem como entradas as saídas dos neurônios da camada anterior, mas não admitem interconexões entre os neurônios da mesma camada.

A estrutura de uma RNAM têm “*alimentação progressiva para diante*” (*feedforward*), não tendo conexões sobre si mesma, seja diretamente ou indiretamente.

Uma RNAM, como mostrada na figura 2.8, exemplifica uma rede de tipo *alimentação para diante*, com múltiplas camadas, totalmente conectada. Isto significa que um neurônio em qualquer camada da rede está conectado a todos os neurônios da camada anterior. O fluxo de sinal através da rede progride para frente de camada em camada, partindo da primeira camada, conectando-se como os neurônios da camada seguinte, até chegar à camada de saída.



FIGURA 2.8 REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA)



Uma RNAM está constituída por 3 tipos de camadas:

**A camada de entrada:** formada por  $n$  unidades (sendo  $n$  o número de entradas externas), tendo como única função a distribuição dos sinais externos para a próxima camada. Não tem nenhuma funcionalidade matemática.

**A camada oculta:** é formada pelos elementos de processamento (EP) e não tem contacto com o exterior. O número de camadas ocultas é variável.

**A camada de saída:** formada por  $m$  elementos de processamento (EP) (sendo  $m$  o número de saídas externas), cujas saídas constituem os vetores de saída externas da RNAM. Somente existe uma camada de saída para cada RNAM.

O número de entradas e de neurônios na saída, normalmente, é função do problema que está sendo estudado. Já o número de neurônios da camada oculta é um problema que está em aberto até hoje.

#### 2.2.6.1 Treinamento de uma RNAM

Este tipo de rede é treinada mediante o algoritmo de *Retropropagação* (*Backpropagation*), o qual esta baseada na regra de *aprendizagem por correção de erro* (HAYKIN, 2001, p. 183). A retropropagação é usada na RNA como regra de

aprendizado supervisionado, o que significa que deve-se dispor de dados de entrada que servirão para o treinamento e de dados de saída que servirão para ir ajustando os pesos. Basicamente, a aprendizagem por retropropagação de erro consiste em encontrar os pesos que resolvem o problema com performance aceitável; consiste de dois passos através das diferentes camadas da rede:

1) Passo para frente, a *propagação*, na qual o sinal de entrada (vetor de entrada) na camada de entrada, propaga-se para frente (neurônio por neurônio) camada por camada através da mesma, e emerge na camada de saída da rede como a resposta real da mesma. Durante o passo de propagação, todos os pesos sinápticos da rede são fixos. Cada EP (neurônio) da camada oculta recebe os sinais de entrada (de um determinado padrão  $p$ ) e os agrega baseado em uma função de entrada de acordo com a equação (2.53). Esta função de entrada gera um sinal de saída ( para o padrão  $p$ ) utilizando uma função de transferência (ver seção 2.2.3.1). Estes sinais de saída são então enviados como sinais de entrada para os EP da camada seguinte, realizando novamente a soma e posteriormente enviadas para a função de transferência para obter um sinal de saída. Isto é feito até a camada de saída.

2) Passo para trás, a *retropropagação*, no qual os pesos sinápticos são todos ajustados de acordo com uma regra de correção de erro, propagando-se para trás (camada por camada) através da rede até a camada de entrada. Especificamente, a resposta real da rede é subtraída de uma resposta desejada para produzir um erro (ou sinal de erro), que se origina em um neurônio de saída da rede. O erro ( $\varepsilon$ ) na saída do neurônio  $j$  é definido pela diferença entre o valor desejado ( $d_j$ ) com o valor calculado ( $y_j$ ) pela rede no processo para adiante (HAYKIN, 1999, p. 161) e dado por:

$$\varepsilon_j = d_j - y_j \quad (2.57)$$

O erro  $\varepsilon_j$  aciona um mecanismo de controle, cujo propósito é aplicar uma seqüência de ajustes corretivos aos pesos sinápticos do neurônio  $j$ . Os ajustes

corretivos são projetados para aproximar passo a passo o sinal de saída  $y_j$  da resposta desejada  $d_j$ . Este objetivo é alcançado minimizando-se uma *função de custo*, definida em termos do erro total da rede como:

$$SQE = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{nn} \varepsilon_j^2 \quad (2.58)$$

onde:

$nn$  é o número de neurônios na camada de saída

O objetivo da retropropagação é obter os valores dos pesos e viés que minimizem a função  $SQE$ , ajustando os pesos  $w_{ij}$ , de tal modo que todos os vetores de entrada sejam corretamente mapeados em suas correspondentes saídas. Então, o processo de aprendizagem pode ser visto como um problema de minimização com função custo  $SQE$  definida em um espaço  $W$ , isto é:

$$\frac{\partial SQE}{\partial w_{ij}} = 0 \quad (2.59)$$

onde  $w_{ij}$  indica o peso do neurônio  $j$  da camada  $i$ .

Os pesos são atualizados e corrigidos por um  $\Delta w_{ij}$  a partir da última camada até a camada inicial. A adaptação dos pesos é feita em forma iterativa de acordo com o modelo:

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij}(n) \quad (2.60)$$

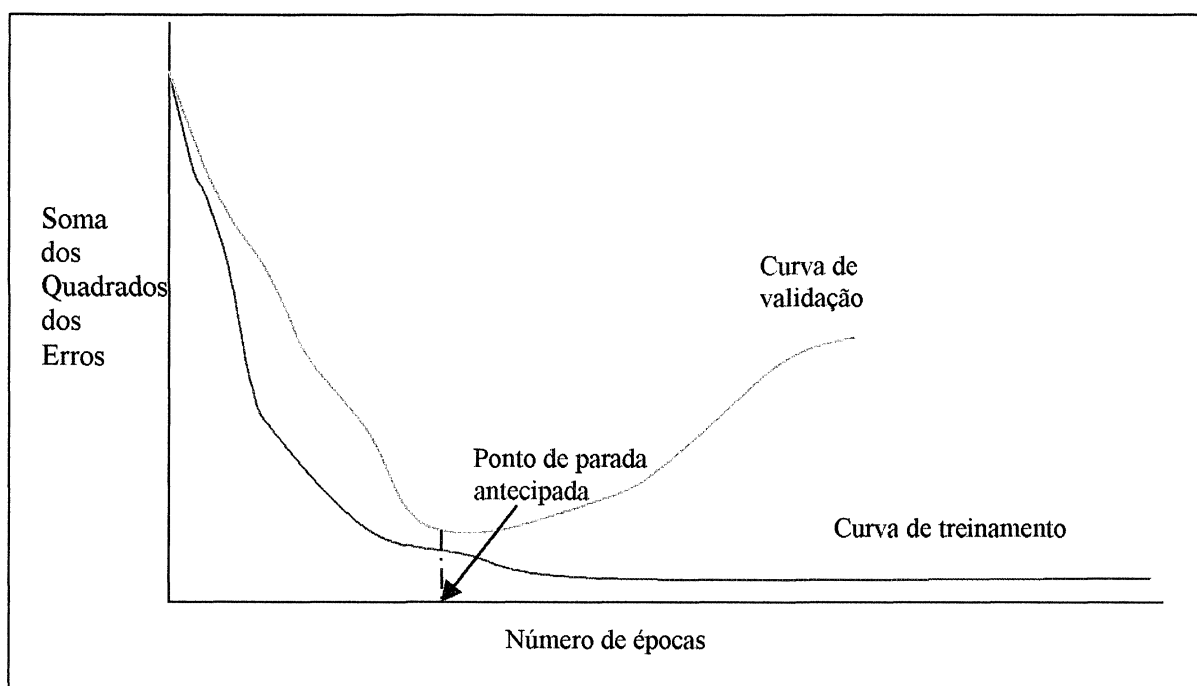
onde o índice  $n$ , significa a iteração corrente.

O processo propagação-retropropagação é feito até que o número de épocas ou iterações, que é informado no início do cálculo, seja atingido. Outra maneira de identificar a convergência do algoritmo é utilizar o cálculo de erro para a saída obtida em cada neurônio da camada de saída. Quando este erro, geralmente sendo usado o SQE como critério de avaliação do erro, em uma época (iteração)

estiver em uma faixa pré-determinada (informada no início do processo) o algoritmo apresenta um grau satisfatório, e o processo pode ser considerado finalizado.

No processo de treinamento é muito difícil perceber qual é o melhor momento para encerrar o treinamento, causando às vezes um excessivo ajustamento dos dados de treinamento ou sobretreinamento, se a sessão não for encerrada no ponto certo. Pode-se identificar o sobretreinamento mediante o critério de parada antecipada, isto quando dispõe-se de um conjunto de dados de treinamento e um subconjunto de dados de validação, como mostrado na figura 2.9.

FIGURA 2.9. REGRA DE PARADA ANTECIPADA BASEADA NA VALIDAÇÃO



A curva de treinamento ou aprendizagem decresce monotonicamente para um número crescente de épocas. Diferentemente, a curva de validação decresce monotonicamente para um mínimo. Quando olha-se para a curva de aprendizagem pode parecer que poder-se-ia melhorar o desempenho indo além de ponto mínimo da curva de validação. Entretanto, o que a rede aprende após este ponto é essencialmente o ruído contido nos dados de treinamento (HAYKIN, 2001, p. 243).

Isto sugere que o ponto mínimo na curva de validação pode ser usado como critério sensato para encerrar a sessão de treinamento, conforme a figura 2.9.

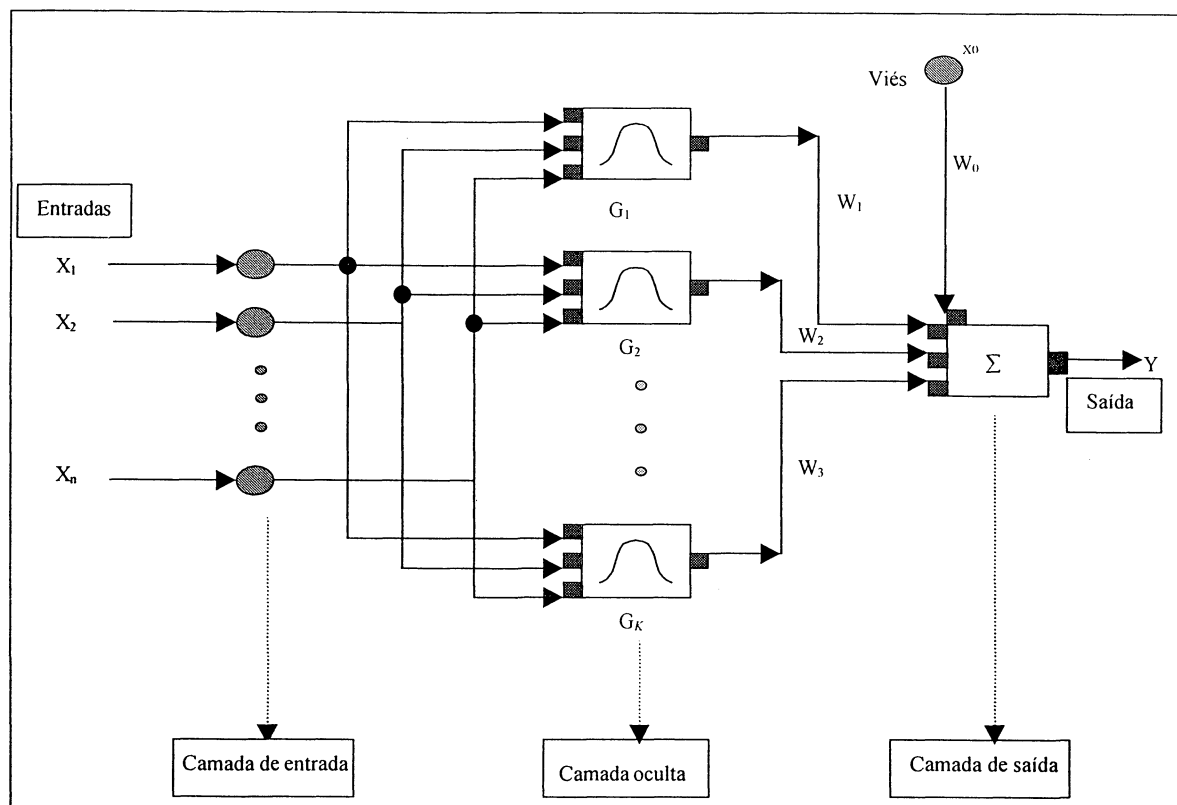
### 2.2.7 Rede Neural de Funções de Base Radial .

No campo da aproximação funcional com RNAs supervisionadas, as RNAs têm sido muito utilizadas nos diferentes campos da ciência durante os últimos anos. Uma rede neural multicamada pode ser considerada como um aproximador universal de funções contínuas (KOVÁCS, 1996, p.103). Porém, as pesquisas têm sido dirigidas para outro tipo de estruturas conexionistas inspiradas em técnicas matemáticas de interpolação (MUÑOZ, 1996, p. 157), tais como as redes de função de base radial (RBF- radial basis function) que são adequadas à aproximação de funções (FELIPETTO, 2001, p. 32).

A estrutura da rede RBF é do tipo multicamadas. O método de treinamento é de tipo direto podendo ser supervisionado, ou podendo ser combinado com o método não supervisionado. Este tipo de rede pode ser usada em problemas de aproximação de funções, predição e classificação.

A Figura 2.10, apresenta a estrutura básica de uma *rede de função de base radial* (RBF), que em sua forma mais básica, envolve três camadas com papéis totalmente diferentes.

FIGURA 2.10 ESTRUTURA DE UMA REDE RBF



**A primeira camada:** é a conexão do modelo como o ambiente externo, à qual são apresentados os vetores de entrada  $x_i$ .

**A segunda camada:** a camada intermediária, é composta de  $K$  unidades de processamento (EP) (neurônios) totalmente conectados aos vetores de entrada. Esta camada tem a tarefa de realizar uma transformação não-linear do espaço  $n$ -dimensional da entrada, em outro espaço  $K$ -dimensional. Os neurônios desta camada são um conjunto de funções de base radial, que constitui uma base arbitrária no espaço por ele formado. As funções de base radial produzem uma resposta diferente de zero somente quando o padrão de entrada está dentro de uma região pequena localizada no espaço de entrada. Cada função requer um centro e um parâmetro escalar denominado raio na qual calcula a distância entre o vetor de entrada e o centro da função de base radial associada. A função que é mais utilizada com a RBF na camada oculta é a função de Gauss, com a forma:

$$G(x) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x - c\|^2\right) \quad (2.61)$$

onde  $c$  representa o vetor centro da  $K$ -ésima função de base radial, e  $\sigma^2$  é a variância associada a cada uma das funções.

**A última camada:** a camada de saída, transforma o espaço vetorial interno em uma saída, através de um processo linear na qual realiza a soma ponderada das saídas das unidades radiais. A saída  $y$  da rede RBF é, portanto, a soma das saídas de cada Gaussiana, ponderadas pelos respectivos pesos sinápticos  $w_K$ , de tal forma que a combinação linear é expressa por:

$$y = \sum_{K=0}^{K-1} w_K G_K(x, c_K, \sigma_K^2) \quad (2.62)$$

Na equação (2.62), o termo  $G_K$  é a  $K$ -ésima função de base radial. Note-se que  $G_K$  representa o quadrado da distância Euclidiana  $D_K^2 = \|x - c_K\|^2$  entre um vetor de entrada  $x$  e o centro  $c_K$  da  $K$ -ésima função de base radial.

O procedimento para a implementação de uma rede neural RBF compreende a determinação, através de um processo de aprendizagem, dos valores adequados aos parâmetros livres da RBF, que são as variâncias  $\sigma^2$ , os centros  $c_K$  e os pesos sinápticos  $w_K$ . O aprendizado ou treinamento consiste em determinar estes parâmetros livres das redes RBF. O método mais conhecido de aprendizado consta dos seguintes passos ( MUÑOZ, 1996, p. 162) :

1. Localização não supervisionada dos  $c$  vetores centrais, mediante aplicação de um algoritmo de agrupamento.
2. Determinação das  $\sigma$  "larguras".
3. Obtenção dos valores dos pesos da camada de saída, mediante regressão linear, quando já forem fixados os restantes parâmetros.

Desta maneira, obtém-se um algoritmo de aprendizagem de convergência polinomial muito mais rápido do que o equivalente da rede RNAM.

Para cada vetor  $x$  do conjunto de treino apresentado à entrada da rede, a saída  $y$  da rede RBF é determinada e é avaliada a diferença entre este valor de saída, e aquele desejado  $d$ , conforme:

$$\varepsilon = d - y \quad (2.63)$$

O erro assim obtido é utilizado para a posterior atualização até a convergência dos centros, pesos sinápticos e variância. As equações de atualização são expressas por (FILIPPETTO, 2001, p.40):

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu_w \varepsilon(n) G_k(n) \quad (2.64)$$

$$c_k(n+1) = c_k(n) + 2\mu_c \varepsilon(n) w_k(n) G_k(n) \frac{x(n) - c_k(n)}{\sigma_k^2(n)} \quad (2.65)$$

$$\sigma_k^2(n+1) = \sigma_k^2(n) + \mu_\sigma \varepsilon(n) w_k(n) G_k(n) \frac{\|x(n) - c_k(n)\|^2}{(\sigma_k^2(n))^2} \quad (2.66)$$

onde  $\mu$  é conhecida como razão de aprendizado.

O treinamento de uma RBF através das equações (2.64), (2.65), (2.66) é continuado até sua convergência, situação em que o valor obtido para o erro de aproximação é menor que um valor máximo permitido. Especificamente, o erro quadrático médio–EQM é usado como critério de avaliação do erro para dar por terminado o treinamento, e dado por:

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon^2 \quad (2.67)$$

onde:  $N$  é o número de vetores de dados de entrada.

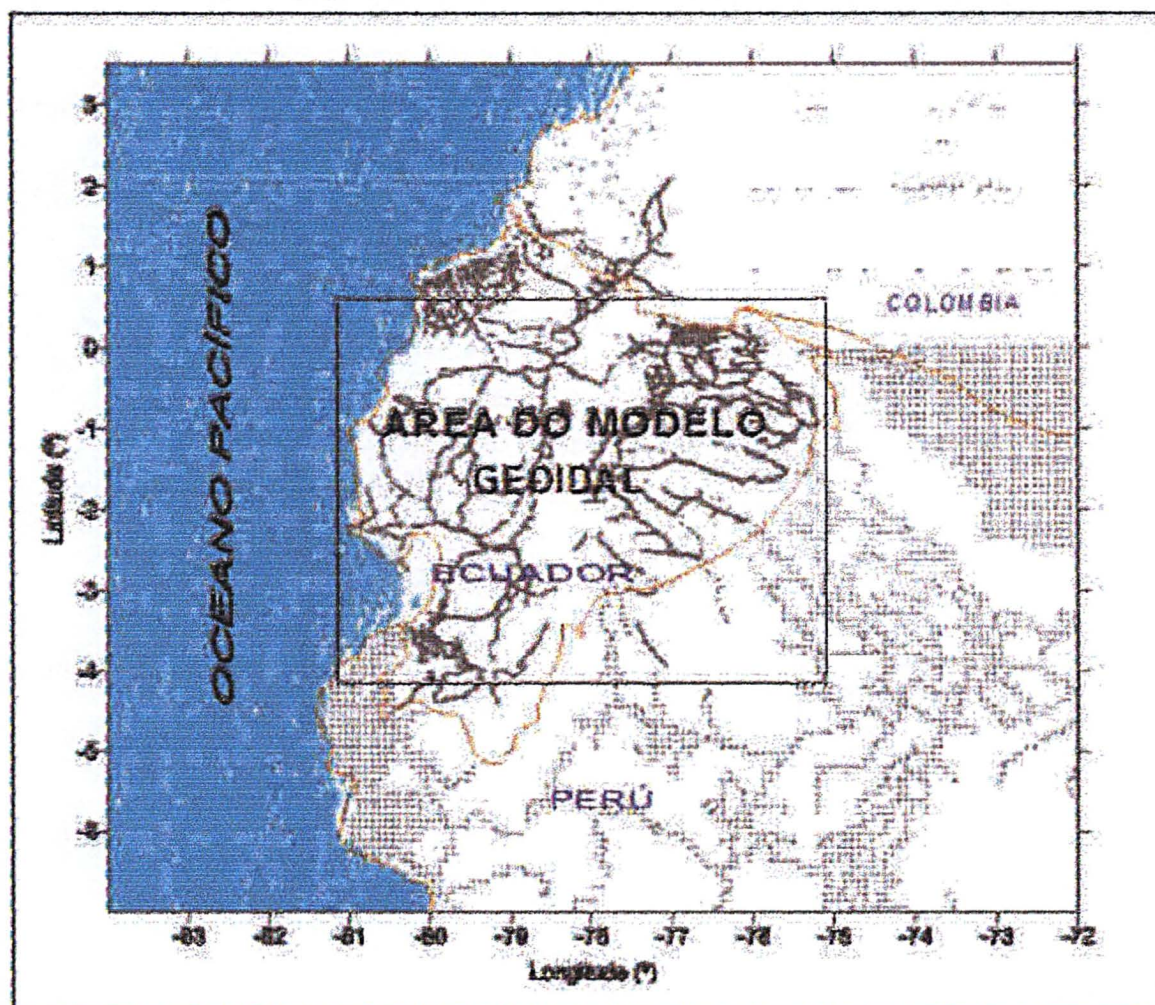


### 3. DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS

O sistema de referência geodésico adotado neste trabalho, visando a compatibilidade dos dados, foi o WGS84 e o sistema de referência vertical para os dados do Equador foi o datum vertical localizado no litoral e conhecido como La Libertad. As altitudes da Colômbia e do Peru encontram-se em seus próprios data verticais. As diferenças existentes entre o datum vertical do Equador e o datum do Peru e da Colômbia são de aproximadamente 4,5 cm e 8 cm, respectivamente.

Com relação à área geográfica, os dados gravimétricos e topográficos encontram-se nos países do Equador, Colômbia, Peru e o Oceano Pacífico (ver figura 3.1). A área de estudo para a determinação do modelo geoidal, está compreendida entre os paralelos 0,5° N e 4° S, e entre os meridianos 75° W e 81° W (ver figura 3.1).

FIGURA 3.1 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS



### 3.1 DADOS GRAVIMÉTRICOS

Diferentes instituições tanto nacionais como internacionais forneceram os dados gravimétricos terrestres e marinhos. São estas:

- Ministerio de Energía y Minas del Ecuador – MEM: foram fornecidos dados gravimétricos terrestres, obtidos nos diferentes levantamentos gravimétricos e por diferentes instituições que tinham por finalidade a exploração petrolífera. Principalmente estes dados encontram-se na região da Amazônia e parte do Litoral Pacífico do Equador (MEM, 2001).
- Subcomissão da Gravidade e do Geóide para América do Sul – SGGSA: foram extraídas do servidor da USP (Universidade de São Paulo), estando compreendidos entre os paralelos 3° N e 7°S, e entre os meridianos 73° W e 81° W (SGGSA, 2000). Estes dados são fornecidos pelos diferentes países sul-americanos e organizações internacionais, sendo compilados e reduzidos ao sistema gravimétrico International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71) referidas ao sistema geodésico WGS84 (BLITZKOW, 1997).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi da Colômbia – IGAC: forneceu os dados da parte da Colômbia compreendidos entre os paralelos 3.5° N e 0.5° N, e os meridianos 79° W e 77° W. As coordenadas geodésicas estão referidas ao sistema GRS80 (Geodetic Reference System, 1980), que para nosso fim, pode ser considerado igual ao WGS84. Os dados de anomalias ar livre da parte do Oceano Pacífico foram fornecidos também pelo IGAC, mas estes dados foram processados por SANDWELL (1997). Os dados estão compreendidos entre os paralelos 3° N e 7° S, e entre os meridianos 80° W e 83° W, contendo: latitude, longitude, e a anomalia de ar livre.

As informações gravimétricas terrestres cedidas pelas diferentes instituições, contêm N° do ponto, latitude, longitude, e altitude sobre o nível médio

dos mares. Os dados marinhos foram organizados num só arquivo. Os dados foram analisados visando a detecção de erros grosseiros e dados duplicados, encontrando-se aproximadamente 20% entre dados grosseiros e duplicados do total de pontos (TIERRA, 2001) restando um total de dados gravimétricos terrestres disponíveis de 14171 pontos.

### 3.2 DADOS TOPOGRÁFICOS

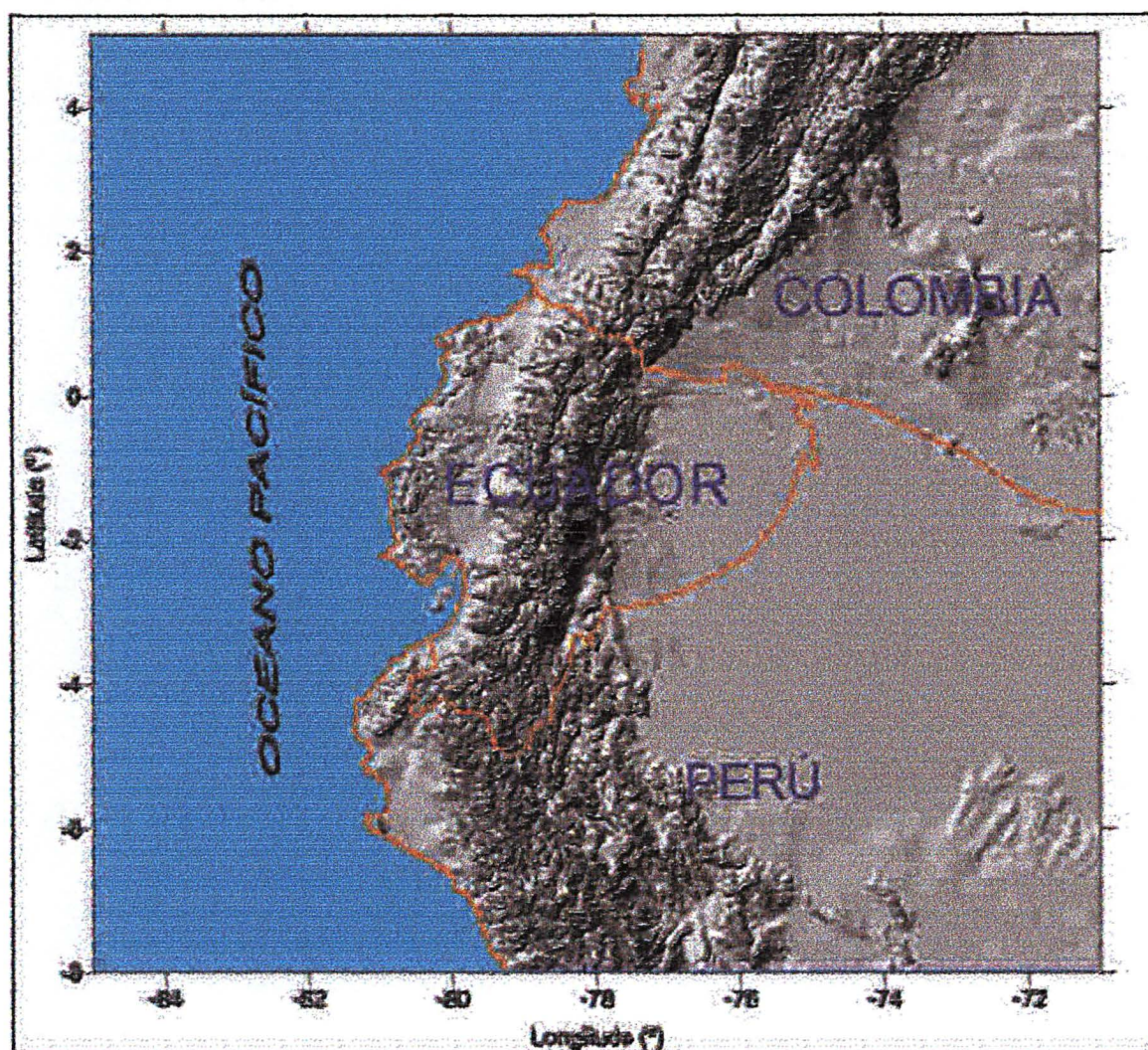
Os dados que constituem o modelo topográfico da área de estudo é o modelo da topografia global GTOPO30 (Global Topographic Model, resolução 30"), e foi fornecido pelo Dr. Walter Subiza.

SUBIZA (2000), indica que o modelo GTOPO30 é o resultado de um projeto do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América do Norte entre 1993 e 1996, em conjunto com diversas organizações internacionais. É um modelo digital do terreno global da parte continental da Terra, com resolução espacial de 1 km x 1 km (30"x30"), totalizando 21600 linhas por 43200 colunas. O sistema de referência usado para as coordenadas horizontais é o WGS84 (semelhança GPS 730) e para as altitudes o nível médio dos mares. Na formação do modelo global foram usadas fontes de dados diferentes, mas na região de estudo foram obtidas mediante a digitalização de cartas topográficas em escalas médias de 1/50000 e 1/100000. O erro médio quadrático estimado para o conjunto dos dados assim obtidos é de aproximadamente 18 m.

Para facilitar o uso dos dados, esse modelo foi dividido em blocos de 50° de latitude por 40° de longitude. O arquivo correspondente à área escolhida para gerar o Modelo Digital do Terreno (MDT) deste trabalho é o W100N40. Deste arquivo, foram extraídos dados a cada 30". A área escolhida está entre os paralelos 5° N e 8° S, e entre os meridianos 71° W e 85° W com altitudes de 1 m a 6039 m. A figura 3.2 mostra este modelo (MDT).



FIGURA 3.2 RELEVO TOPOGRAFICO A PARTIR DO MDT GTOPO30



### 3.3 MODELO GEOPOTENCIAL

O modelo geopotencial usado foi o Earth Gravitational Model 1996 – EGM96 (LEMOINE, 1998), onde os coeficientes do modelo e seus desvios padrão estão completos até o grau e ordem 360. Este foi fornecido pela Escola do Geóide da IAG realizada no Rio de Janeiro em setembro de 1997. Este modelo está baseado no sistema geodésico WGS84(G873), sendo compatível com as observações de controle GPS. Foi calculado a partir de anomalias ar-livre médias com espaçamento de 30"x30". Maiores informações podem ser encontradas em LEIMONE (1998).

### 3.4 DADOS DE DENSIDADES

No desenvolvimento teórico do cálculo da correção Bouguer, utiliza-se de forma geral o valor da densidade da crosta igual a  $2,67 \text{ g/cm}^3$ . Este valor é representativo tipicamente de rochas graníticas, podendo variar entre  $2 \text{ g/cm}^3$  em regiões sedimentares e  $3 \text{ g/cm}^3$  em regiões vulcânicas (PESSOA, 1997, p. 79). A geologia da área de estudo é muito variada, e basicamente esta constituída por 5 regiões (PALADINES, 1996): A região da Bacia do Litoral, da Cordilheira Ocidental, do Vale Central, da Cordilheira Real, e da Bacia Amazônica. O mapa geológico na escala 1: 1.000.000 da área de estudo foi digitalizado com auxílio do software ARC VIEW.

Os valores das densidades das diferentes camadas geológicas na região da Bacia do Litoral e Amazônica foram obtidos a partir de perfurações feitas para estudos de petróleo (MEM, 2001), e mediante a utilização da equação (2.40), foi obtido o valor médio da densidade da coluna geológica. Para as outras regiões, as densidades das camadas geológicas foram estimadas a partir do mapa geológico digital, mediante a realização aproximada (devido ao não conhecimento exatc da forma e dimensão da estrutura geológica por falta de estudos geofísicos) de perfis geológicos tanto laterais quanto longitudinais com malha de 10'. Com o conhecimento aproximado da composição dos minerais das rochas baseados em estudos de MOSQUERA (1980), HURLBUT (1984), e com a aplicação da equação (2.40), determinou-se em forma aproximada o valor médio da densidade.

A partir destas informações, calculou-se os valores médios de densidades na região do estudo das ondulações geoidais, ver tabela 3.1. Os valores médios de densidades obtidos estão compreendidos entre  $2,42 \text{ g/cm}^3$  e  $2,75 \text{ g/cm}^3$ , portanto com uma variação de até  $0,33 \text{ g/cm}^3$ , aproximadamente 14%. Para as áreas da Colômbia e Perú, foi adotado o valor da densidade de  $2,67 \text{ g/cm}^3$ , e para o oceano Pacífico de  $1,027 \text{ g/cm}^3$ .

Na tabela 3.1, apresenta-se parte do arquivo correspondente aos valores de densidade obtidos, contendo: a latitude, a longitude, o valor médio de densidade.

TABELA 3.1 VALORES DE DENSIDADE MÉDIA

| Latitude<br>(°) | Longitude<br>(°) | Densidade<br>g/cm <sup>3</sup> |
|-----------------|------------------|--------------------------------|
| -4,95           | -79,25           | 2,75                           |
| -5              | -79              | 2,75                           |
| -4,2            | -78,95           | 2,75                           |
| -3,75           | -79,7            | 2,7                            |
| -3,9            | -79,35           | 2,7                            |
| -4              | -79,55           | 2,7                            |
| -3,55           | -78,8            | 2,42                           |
| -3,35           | -80,3            | 2,42                           |
| -3,2            | -80              | 2,42                           |
| -2,7            | -80,3            | 2,48                           |
| -2,2            | -79,25           | 2,48                           |
| -1,97           | -80,7            | 2,48                           |
| -2,35           | -79,05           | 2,58                           |
| -2,3            | -78,8            | 2,58                           |
| -2,35           | -78,75           | 2,58                           |
| -7              | -77,8            | 2,62                           |
| -6              | -77,5            | 2,62                           |
| -4,5            | -77,7            | 2,62                           |
| -6,43           | -80,77           | 1,027                          |
| -6,07           | -81,08           | 1,027                          |
| -5,72           | -81,24           | 1,027                          |
| -5,37           | -77,92           | 2,67                           |
| -5,68           | -77,45           | 2,67                           |
| -6,23           | -76,78           | 2,67                           |

Para fazer o processo do treinamento da RNA para a elaboração do modelo digital de variação lateral de densidades, foram utilizados 400 pontos, conforme a seção 4.3.1.

BAJRACHARYA (2002), fez um estudo usando variação de densidade lateral no cálculo da correção do terreno. O resultado obtido mostrou que a diferença na obtenção da ondulação geoidal pode chegar a ser até 10 cm. Ele sugere o uso

de informação de densidade, mas, no caso que não se tenha, sugere que seja usada uma densidade média da área de estudo na correção do terreno, especialmente em áreas de grandes montanhas.

### 3.5 DADOS DE CONTROLE PARA A AVALIAÇÃO DA REDE NEURAL TREINADA

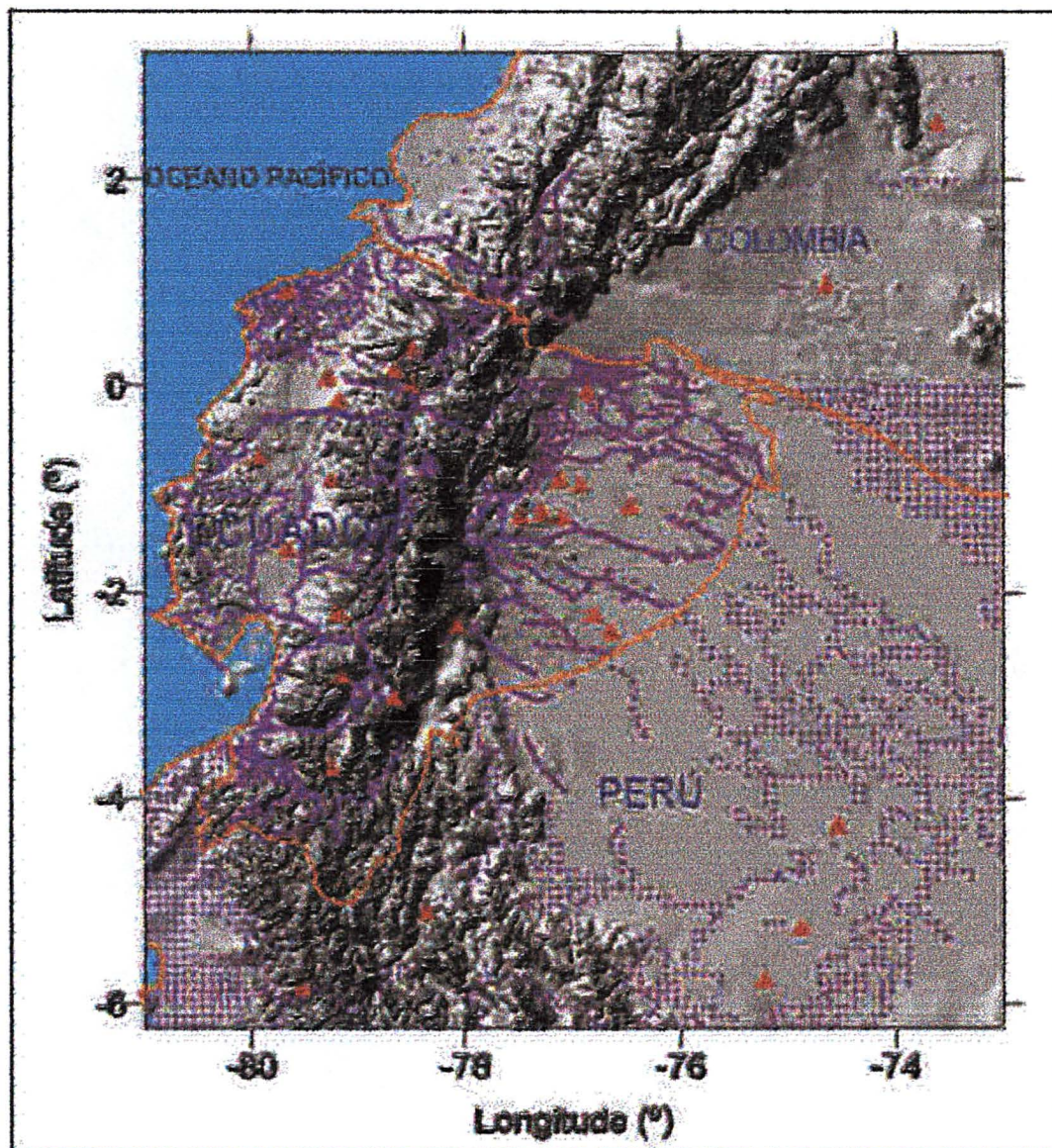
No processo de treinamento da RNA é muito difícil saber quando dar por terminado o processo de aprendizagem (ver seção 2.2.6.1), podendo acontecer que exista um sobre-treinamento. Para se evitar isto, deve-se ter um conjunto de dados para avaliar a performance da rede neural treinada. Neste trabalho, foram treinadas RNAs para predizer:

- Valores de variação lateral de densidades
- Anomalias de ar livre
- Anomalias de Bouguer

No treinamento das RNAs, as saídas da rede são as anomalias do ar livre e as anomalias de Bouguer, o que exigia que se tivesse à disposição dados de controle destas anomalias. Um total de 31 pontos, principalmente em áreas sem informações gravimétricas, foi escolhido para a avaliação das RNAs. Estes pontos também foram escolhidos de forma a estarem distribuídos em toda a área de estudo, e em diferentes topografias. Na figura 3.3 estes pontos estão representados com triângulos de cor vermelha.



FIGURA 3.3 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AVALIAÇÃO DA RNA



Estes dados de controle servem para avaliar tanto a RNA treinada para prever anomalias de ar livre, a RNA treinada para prever anomalias de Bouguer, quanto para avaliar os resultados obtidos da interpolação feita com o método Kriging.

Na tabela 3.2 estão apresentados o número do ponto de controle, a latitude, a longitude, a altitude nivelada ( $H_n$ ), a densidade, os valores da anomalia de ar livre (A.Ar-Livre) e da anomalia de Bouguer (A. Bouguer) que foram calculadas de acordo com o apresentado na seção 2.1.5.2.



TABELA 3.2 DADOS DE CONTROLE DAS ANOMALIAS DE AR-LIVRE E BOUGUER

| Nº Ponto de Controle | Latitude (°) | Longitude (°) | $H_n$ (m) | densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | A. Ar- Livre (mGal) | A. Bouguer (mGal) |
|----------------------|--------------|---------------|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------|
| 1                    | 2,5322       | -73,619       | 248       | 2,67                           | 36,000              | 14,949            |
| 2                    | 0,9583333    | -74,625       | 400       | 2,67                           | 37,000              | 12,598            |
| 3                    | 0,9033       | -79,66        | 12,3      | 2,48                           | 15,032              | 16,904            |
| 4                    | 0,67         | -77,54        | 2668,2    | 2,67                           | 135,626             | -146,813          |
| 5                    | 0,3535       | -78,5132      | 2236,7    | 2,58                           | 71,732              | -133,262          |
| 6                    | 0,1333       | -78,65        | 1639,8    | 2,58                           | 40,471              | -87,234           |
| 7                    | 0,0533       | -79,2833      | 204,8     | 2,42                           | 11,515              | -0,167            |
| 8                    | -0,0133      | -78,5         | 2810      | 2,58                           | 102,459             | -173,006          |
| 9                    | -0,0783      | -76,87        | 296       | 2,48                           | -21,643             | -51,682           |
| 10                   | -0,165       | -79,18        | 447,3     | 2,42                           | 62,251              | 23,504            |
| 11                   | -0,7067      | -79,9183      | 38,3      | 2,48                           | 14,527              | 29,768            |
| 12                   | -0,9333      | -77,1167      | 354       | 2,48                           | -28,667             | -61,007           |
| 13                   | -0,94        | -79,2617      | 173       | 2,42                           | -31,450             | -8,700            |
| 14                   | -0,9833      | -76,9167      | 381       | 2,42                           | -11,015             | -40,389           |
| 15                   | -1,18        | -76,47        | 205       | 2,42                           | -12,809             | -29,322           |
| 16                   | -1,25        | -77,29        | 297       | 2,48                           | -52,783             | -82,779           |
| 17                   | -1,28        | -77,48        | 335       | 2,48                           | -60,216             | -88,603           |
| 18                   | -1,3         | -77,1         | 272       | 2,42                           | -33,672             | -58,554           |
| 19                   | -1,6117      | -79,6633      | 8,6       | 2,42                           | 15,793              | 17,946            |
| 20                   | -2,2317      | -79,1733      | 250,8     | 2,58                           | -56,363             | -58,275           |
| 21                   | -2,24        | -76,8         | 286       | 2,42                           | -23,596             | -48,988           |
| 22                   | -2,3433      | -78,0833      | 1028,7    | 2,62                           | -6,376              | -101,703          |
| 23                   | -2,41        | -76,64        | 262       | 2,42                           | -18,206             | -42,712           |
| 24                   | -2,8283      | -79,145       | 3158,6    | 2,58                           | 125,960             | -185,939          |
| 25                   | -3,05        | -78,65        | 2616,2    | 2,75                           | 101,504             | -174,525          |
| 26                   | -3,7283      | -79,2633      | 2989      | 2,58                           | 112,306             | -158,807          |
| 27                   | -4,291667    | -74,54167     | 93        | 2,67                           | 13,000              | 6,665             |
| 28                   | -5,125       | -78,375       | 279       | 2,67                           | -130,000            | -150,774          |
| 29                   | -5,291667    | -74,875       | 89        | 2,67                           | -8,000              | -11,500           |
| 30                   | -5,791667    | -75,20833     | 104       | 2,67                           | -24,000             | -27,147           |
| 31                   | -5,875       | -79,542       | 1472      | 2,67                           | 47,000              | -86,618           |

### 3.6 DADOS DE CONTROLE DOS MODELOS GEOIDAIS

Na figura 2.1 da seção 2.1.3, a ondulação geoidal  $N$  é calculada de forma aproximada ao longo da normal ao elipsóide de referência, e é igual à diferença entre a altitude elipsoidal da estação (obtida por levantamento com GPS sobre pontos da rede de nivelamento) e a altitude ortométrica. Devido ao não conhecimento desta última, ela é substituída pela altitude nivelada (obtida pelo nivelamento), tal que:

$$N_{GPS} \cong h - Hn \quad (3.1)$$

O IGM (Instituto Geográfico Militar) do Equador dispõe de dados de ondulação, com coordenadas geodésicas que foram obtidos mediante levantamentos com GPS. Estas estações foram usadas como pontos de controle para a avaliação do modelo geoidal local, possuem também altitudes sobre o nível médio dos mares, estão referidas ao datum vertical do país, e foram medidas em diferentes épocas e por diferentes métodos de nivelamento (LEIVA, 2003). Foi necessário realizar novos levantamentos de 11 novos pontos com GPS, com o propósito de ter estações para a avaliação em regiões onde não existia controle. Para o rastreo GPS, foram utilizados receptores de dupla frequência, método estático, com um tempo de rastreo de 3 horas como média. O pós-processamento foi realizado com a dupla diferença de fase da portadora. Com a finalidade de calcular as ondulações geoidais, os pontos foram estabelecidos sobre a rede de controle horizontal do Equador dos quais se dispunha do valor da altitude sobre o nível médio do mar, mas não tinham informação da altitude elipsoidal.

A tabela 3.3, apresenta os dados de controle no Equador, com as coordenadas geodésicas: Latitude, Longitude e Altitude elipsoidal ( $h$ ) no WGS84, assim como, a Altitude Nivelada ( $Hn$ ) (sobre o nível médio dos mares, referida ao datum vertical do Equador), e o valor da ondulação geoidal ( $N$ ) calculada pela equação (3.1) em cada ponto.

TABELA 3.3 DADOS DE CONTROLE ABSOLUTOS GPS/RNs, NO EQUADOR

| Nº | ESTAÇÃO         | Latitude<br>(°) | Longitude<br>(°) | Altitude<br>Elipsoidal<br>$h$<br>(m) | Altitude<br>Nivelada<br>$H_n$<br>(m) | Ondulação<br>Geoidal<br>$N_{GPS}$<br>(m) |
|----|-----------------|-----------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 1  | ANCONCITO       | -2,32959        | -80,89473        | 66,476                               | 55,187                               | 11,289                                   |
| 2  | CASITAGUA       | -0,03657        | -78,48016        | 3541,47                              | 3514,720                             | 26,747                                   |
| 3  | CATEQUILLA      | 0,00021         | -78,42843        | 2663,3                               | 2636,034                             | 27,263                                   |
| 4  | HOSP. DEL SUR   | -0,24447        | -78,54098        | 2951,84                              | 2924,024                             | 27,817                                   |
| 5  | IGM VIGA        | -0,21515        | -78,49360        | 2920,32                              | 2892,724                             | 27,591                                   |
| 6  | ILALO           | -0,26280        | -78,41945        | 3216,41                              | 3188,916                             | 27,491                                   |
| 7  | LATACUNGA       | -0,81395        | -78,62650        | 2941,24                              | 2913,570                             | 27,668                                   |
| 8  | LULUNURCO       | -0,07339        | -78,50732        | 3139,64                              | 3112,130                             | 27,505                                   |
| 9  | MINAYA          | -0,96317        | -80,27876        | 566,984                              | 551,024                              | 15,960                                   |
| 10 | MIRAVALLE       | -0,27040        | -78,50888        | 3211,86                              | 3184,521                             | 27,343                                   |
| 11 | MULMUL          | -1,43772        | -78,54330        | 3904,49                              | 3877,840                             | 26,647                                   |
| 12 | PANECILLO GEOD. | -0,22908        | -78,51831        | 3043,18                              | 3015,370                             | 27,811                                   |
| 13 | REDONDO         | 0,30442         | -78,04619        | 3863,45                              | 3835,944                             | 27,505                                   |
| 14 | SACHA           | -0,32644        | -76,91252        | 345,629                              | 327,370                              | 18,259                                   |
| 15 | UNGUI II        | -0,23735        | -78,55716        | 3597,68                              | 3569,690                             | 27,992                                   |
| 16 | YAUSAY          | -2,69128        | -78,73145        | 3658,26                              | 3634,290                             | 23,971                                   |
| 17 | ZAGRUN          | -1,90750        | -78,61064        | 3727,69                              | 3700,070                             | 27,620                                   |
| 18 | MANTA           | -0,93660        | -80,67116        | 35,687                               | 21,570                               | 14,117                                   |
| 19 | LOJA UTPL       | -3,98895        | -79,19919        | 2135,03                              | 2116,823                             | 18,204                                   |
| 20 | BALZAR          | -1,36748        | -79,90861        | 56,421                               | 37,850                               | 18,571                                   |
| 21 | EL DESVIO       | -1,04048        | -79,92402        | 316,229                              | 297,649                              | 18,580                                   |
| 22 | CUERVO GRANDE   | -2,35870        | -79,53278        | 169,81                               | 152,699                              | 17,111                                   |
| 23 | LUMBAQUI        | 0,00835         | -77,32222        | 1086,4                               | 1064,240                             | 22,160                                   |
| 24 | PAMBAMARCA      | -0,07970        | -78,20902        | 4103,43                              | 4075,790                             | 27,637                                   |
| 25 | CULAURO         | -1,17227        | -77,81718        | 1063,45                              | 1043,660                             | 19,789                                   |
| 26 | FARO-GUAYAQUIL  | -2,15576        | -79,88814        | 39,6289                              | 21,806                               | 17,823                                   |
| 27 | CACHARI         | -1,77897        | -79,46395        | 93,6932                              | 74,681                               | 19,012                                   |
| 28 | ESMERALDAS N.E. | 0,95576         | -79,67366        | 281,809                              | 266,750                              | 15,059                                   |
| 29 | DOMINGUILLO     | -0,43546        | -80,18090        | 695,435                              | 678,370                              | 17,065                                   |
| 30 | BARCELONA       | -1,94079        | -80,68090        | 151,663                              | 136,520                              | 15,143                                   |
| 31 | CORAL           | -2,22119        | -80,93063        | 63,7053                              | 52,161                               | 11,544                                   |

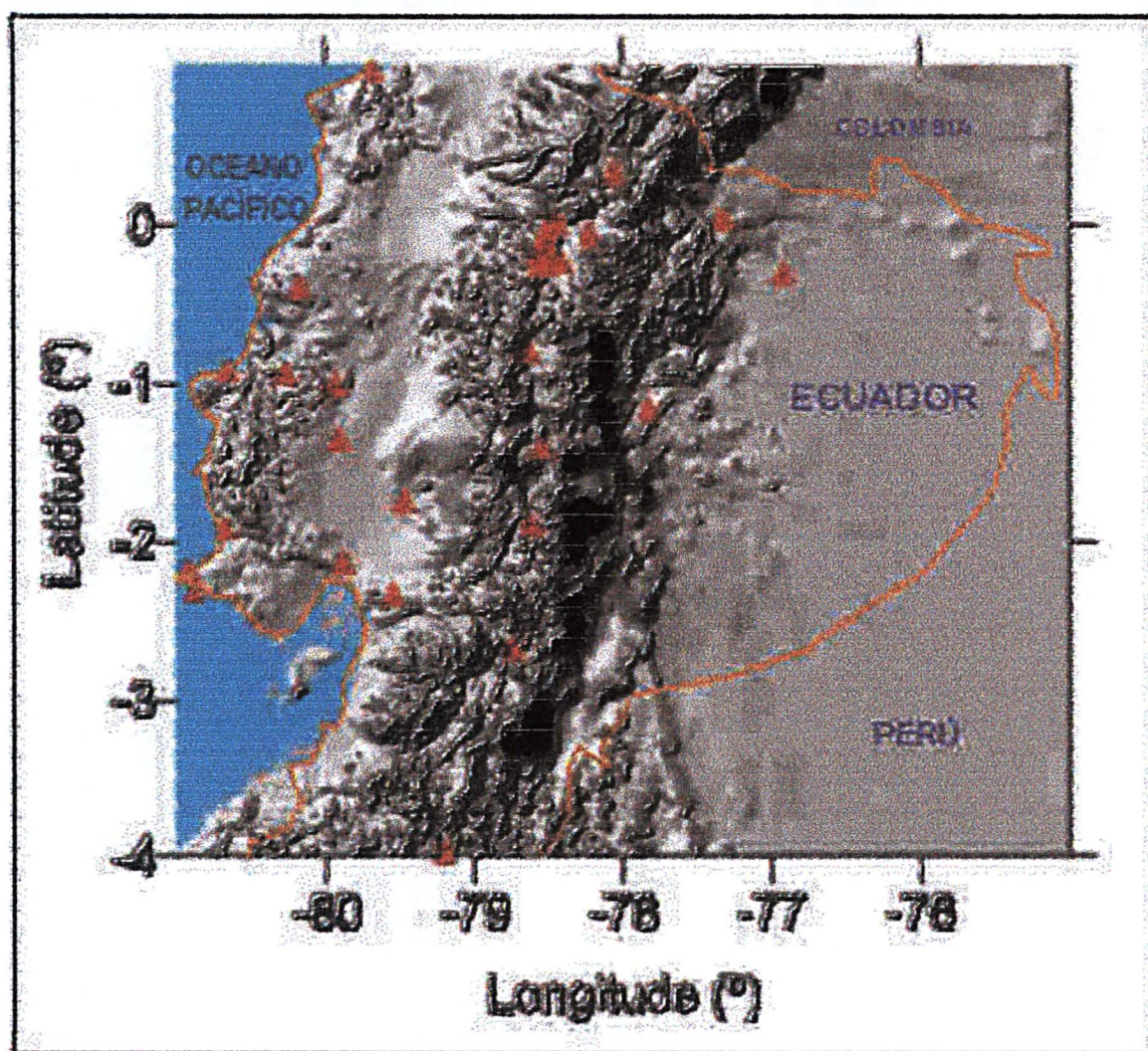
Estes valores das ondulações geoidais foram usados para fazer uma comparação absoluta utilizando a diferença entre a ondulação geoidal obtida pelo

modelo do geóide local ( $N_{GL}$ ) e a obtida pela equação (3.1) ( $N_{GPS}$ ), que em forma matemática fica:

$$DN = N_{GL} - N_{GPS} \quad (3.2)$$

A figura 3.4, apresenta a localização dos pontos de controle (triângulos vermelhos, diferentes dos pontos de controle para a avaliação da RNA da figura 3.3) para a avaliação absoluta da ondulação geoidal obtida na área de estudo.

FIGURA 3.4 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE ABSOLUTOS



Pode ser usada uma outra forma de avaliação dos modelos geoidais, denominada de relativa (SUBIZA,2000), (PESSOA, 1997). O princípio da avaliação

relativa baseia-se na dupla diferença entre ondulações. A primeira diferença resulta da subtração dos valores geoidais de pontos distintos em um mesmo modelo. Assim tem-se diferença de ondulações entre duas estações expressa por:

$$\Delta N_{GPS} = N_{GPS}^2 - N_{GPS}^1 = (h_2 - h_1) - (Hn_2 - Hn_1) = \Delta h - \Delta Hn \quad (3.3)$$

$$\Delta N_{GL} = N_{GL}^2 - N_{GL}^1 \quad (3.4)$$

sendo:

$N_2$  e  $N_1$  as alturas geoidais, obtidas pela equação (3.1) nas estações 2 e 1, respectivamente;

$N_{GL}^2$  e  $N_{GL}^1$  as alturas geoidais, obtidas do modelo geoidal local nas estações 2 e 1, respectivamente

A segunda diferença consiste na subtração, para os mesmos pares de pontos, das equações (3.4) e (3.3), da seguinte forma:

$$\delta DN = \Delta N_{GL} - \Delta N_{GPS} \quad (3.5)$$

Relacionando a equação (3.5) com as distâncias existentes entre as estações, se estabelece o erro relativo por quilômetro entre as estações.

Na tabela 3.4, se mostram os dados de controle que foram utilizados para realizar a avaliação relativa, com o número do ponto, a linha base (distância entre duas estações), a diferença das altitudes elipsoidais, a diferença das altitudes niveladas, e a diferença das ondulações geoidais calculada pela equação (3.3).

TABELA 3.4. DADOS DE CONTROLE RELATIVOS GPS/RNs, NO EQUADOR

| Nº | Linha base                  | Distância<br>(km) | $\Delta h$<br>(m) | $\Delta Hn$<br>(m) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| 1  | IGM-Casituaga               | 19,82             | 621,15            | 622                | -0,85                   |
| 2  | Hospital del sur-Catequilla | 29,83             | -288,54           | -287,99            | -0,55                   |
| 3  | IGM-Pambamarca              | 35,08             | 1183,11           | 1183,07            | 0,04                    |
| 4  | Latacunga-Illalo            | 65,19             | 275,17            | 275,35             | -0,18                   |
| 5  | IGM-Redondo                 | 76,08             | 943,13            | 943,23             | -0,10                   |
| 6  | Zagrun-Yausay               | 87,75             | -69,43            | -65,78             | -3,65                   |
| 7  | Latacunga-Culaurco          | 98,46             | -1877,79          | -1869,91           | -7,88                   |
| 8  | IGM-Lumbaqui                | 132,77            | -1833,92          | -1828,48           | -5,44                   |
| 9  | Latacunga-Balzar            | 155,33            | -2884,82          | -2875,72           | -9,10                   |
| 10 | IGM-Sacha                   | 176,49            | -2574,69          | -2565,35           | -9,34                   |
| 11 | Latacunga-Sacha             | 198,32            | -2595,61          | -2586,2            | -9,41                   |
| 12 | IGM-Balzar                  | 202,65            | -2863,9           | -2854,87           | -9,03                   |
| 13 | IGM-Minaya                  | 215,3             | -2353,34          | -2341,7            | -11,64                  |
| 14 | Latacunga-Manta             | 228,05            | -2905,55          | -2892              | -13,55                  |
| 15 | Loja UTPL-Cachari           | 246,18            | -2041,34          | -2042,14           | 0,80                    |
| 16 | IGM-Manta                   | 255,24            | -2884,63          | -2871,15           | -13,48                  |
| 17 | Loja UTPL-Coral             | 274,35            | -2071,32          | -2064,66           | -6,66                   |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona         | 280,08            | -1983,37          | -1980,3            | -3,07                   |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul            | 291,5             | 1769,46           | 1761,02            | 8,44                    |
| 20 | Loja UTPL-Balzar            | 300,44            | -2078,61          | -2078,98           | 0,37                    |
| 21 | IGM-Barcelona               | 309,36            | -2768,66          | -2756,2            | -12,46                  |
| 22 | Loja UTPL-EI Desvio         | 335,88            | -1818,8           | -1819,17           | 0,37                    |
| 23 | IGM-Anconcito               | 355,11            | -2853,84          | -2837,54           | -16,30                  |
| 24 | Loja UTPL-Manta             | 375,13            | -2099,34          | -2095,25           | -4,09                   |
| 25 | Anconcito-Pambamarca        | 388,97            | 4036,95           | 4020,6             | 16,35                   |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo       | 407,84            | -1439,6           | -1438,45           | -1,15                   |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle         | 418,39            | 1076,83           | 1067,7             | 9,13                    |
| 28 | Anconcito-Redondo           | 430,57            | 3796,97           | 3780,76            | 16,21                   |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua         | 444,41            | 1406,44           | 1397,9             | 8,54                    |
| 30 | Loja UTPL-Catequilla        | 449,43            | 528,27            | 519,21             | 9,06                    |
| 31 | Loja UTPL-Sacha             | 478,21            | -1789,4           | -1789,45           | 0,05                    |
| 32 | Loja UTPL-Redondo           | 491,87            | 1728,42           | 1719,12            | 9,30                    |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas        | 549,24            | -1983,37          | -1980,3            | -3,07                   |



## 4. METODOLOGIA E RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada, inicialmente a determinação e validação de modelo geoidal obtido a partir do EGM96. Posteriormente, será mostrada a metodologia usada na determinação do **Modelo Digital** de variação lateral de Densidades (MDD), assim como a geração de uma malha regular de anomalias gravimétricas mediante a utilização de técnicas fundamentadas em Redes Neurais Artificiais (RNA). A RNA Multicamada e uma Função de Base Radial (RBF) podem ser treinadas para predizer tanto as anomalias de ar-livre quanto as de Bouguer. Foi também usada uma rede neural do tipo RBF com a finalidade de gerar o MDD. A partir das anomalias de Bouguer é possível também se calcular as correspondentes do ar-livre. No presente estudo, para o treinamento das RNAs, foram usados os dados disponíveis, descritos no capítulo 3, e de acordo com a teoria fundamental, descrita no capítulo 2. Depois de terminado o treinamento, as RNAs foram utilizadas para predizer e poder gerar malhas de anomalias gravimétricas de ar-livre com espaçamento de 5km x 5km, 10km x 10km, 15km x 15km, e 20km x 20km. Com a finalidade de comparação com as RNAs, também foram geradas malhas (com os mesmos espaçamentos) com o método clássico de interpolação conhecido como Kriging. Para determinar as diferenças entre os métodos anteriores, foram usados os pontos de controle como pontos “verdadeiros”. Finalmente, foram calculados os modelos geoidais resultantes usando a técnica remover-restaurar.

### 4.1 DETERMINAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO GEOIDAL DO EGM96

Na seção 2.1.6 foi mostrado que a integral de Stokes pode ser aplicada na determinação da ondulação geoidal a partir da anomalia residual ( $\Delta g_{res}$ ), resultante da subtração da anomalia gerada pelo modelo geopotencial, dos valores advindos de observações. Obtém-se assim a componente gravimétrica, que combinada à topográfica, representam características de alta frequência do campo da gravidade. Ao modelo geopotencial são devidas as componentes de longo comprimento de onda.

O modelo usado neste trabalho foi o EGM96. Para determinar o grau (n) e ordem (m) dos coeficientes a serem utilizados foram feitos vários testes utilizando o desenvolvimento até os graus e ordens (n e m) iguais a 50, 70, 90, 180 e 360. Calculou-se o valor da ondulação geoidal em 18 pontos dos quais eram conhecidas as altitudes elipsóidicas (com GPS) e “ortométricas” (obtidas com nivelamento geométrico convencional). As alturas geoidais obtidas com o EGM96 foram comparadas com as alturas geoidais obtidas com GPS e nivelamento. Os valores da média, desvio padrão, valor máximo e valor mínimo obtidos, são mostrados na tabela 4.1.

TABELA 4.1. DIFERENÇAS NA ONDULAÇÃO GEOIDAL

| Número de Grau e Ordem |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 50    | 70    | 90    | 180   | 360   |
| Média (m)              | -3,67 | -2,18 | -1,08 | -0,19 | 0,27  |
| Desvio Padrão (m)      | 4,42  | 3,69  | 3,07  | 1,4   | 1,22  |
| Mínima (m)             | -9,84 | -7,27 | -6,45 | -3,13 | -2,03 |
| Máxima (m)             | 3,83  | 5,36  | 5,53  | 2,48  | 2,24  |

A tabela 4.1, mostra que dependendo do grau e ordem dos coeficientes, as diferenças na ondulação geoidal podem chegar a 10 m aproximadamente. De acordo com a tabela 4.1, pode-se dizer que os melhores resultados foram obtidos com grau e ordem 180 e 360.

Posteriormente, se fez uma validação relativa da ondulação geoidal com os mesmos grau e ordem anteriores. A tabela 4.2, mostra os resultados obtidos.

TABELA 4.2. DIFERENÇAS DA VALIDAÇÃO RELATIVA DA ONDULAÇÃO GEOIDAL

| Número de Grau e Ordem |        |       |       |       |       |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 50     | 70    | 90    | 180   | 360   |
| Média (m)              | -4,40  | -2,79 | -1,84 | 0,62  | 0,56  |
| Desvio Padrão (m)      | 4,42   | 3,74  | 3,13  | 1,43  | 1,25  |
| Mínima (m)             | -10,33 | -7,68 | -7,10 | -2,36 | -1,78 |
| Máxima (m)             | 3,34   | 4,91  | 4,87  | 3,25  | 2,50  |



Observando os valores da tabela 4.2, pode-se dizer que, o modelo EGM96 com coeficientes de grau e ordem de 360, dão os melhores resultados na área de estudo, razão pelo qual foram usados até estes grau e ordem de desenvolvimento neste trabalho.

#### 4.1.1 Anomalia Ar-Livre e Ondulação Geoidal do Modelo EGM96

A anomalia de ar-livre e as ondulações geoidais de referência do modelo EGM96 foram geradas entre as latitudes  $3^{\circ}$  e  $-6^{\circ}$ , e entre as longitudes  $-83^{\circ}$  e  $-73^{\circ}$ , em intervalos de  $2.5' \times 2.5'$ ,  $5' \times 5'$ ,  $7.5' \times 7.5'$  e  $10' \times 10'$ . As figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.6, 4.8 mostram as contribuições do modelo geopotencial EGM96 no processo remover-restaurar (seção 2.1.6).

A figura 4.1 e a figura 4.2, mostram a anomalia de ar-livre e as ondulações geoidais obtidas do EGM96 para um intervalo ou malha de  $2.5' \times 2.5'$ , aproximadamente 5 km. Totalizaram 52297 valores, correspondendo a uma matriz de  $241 \times 217$  elementos.

FIGURA 4.1. ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDA DO EGM96 COM MALHA DE 5km  
(intervalo de contorno: 20 mGal)

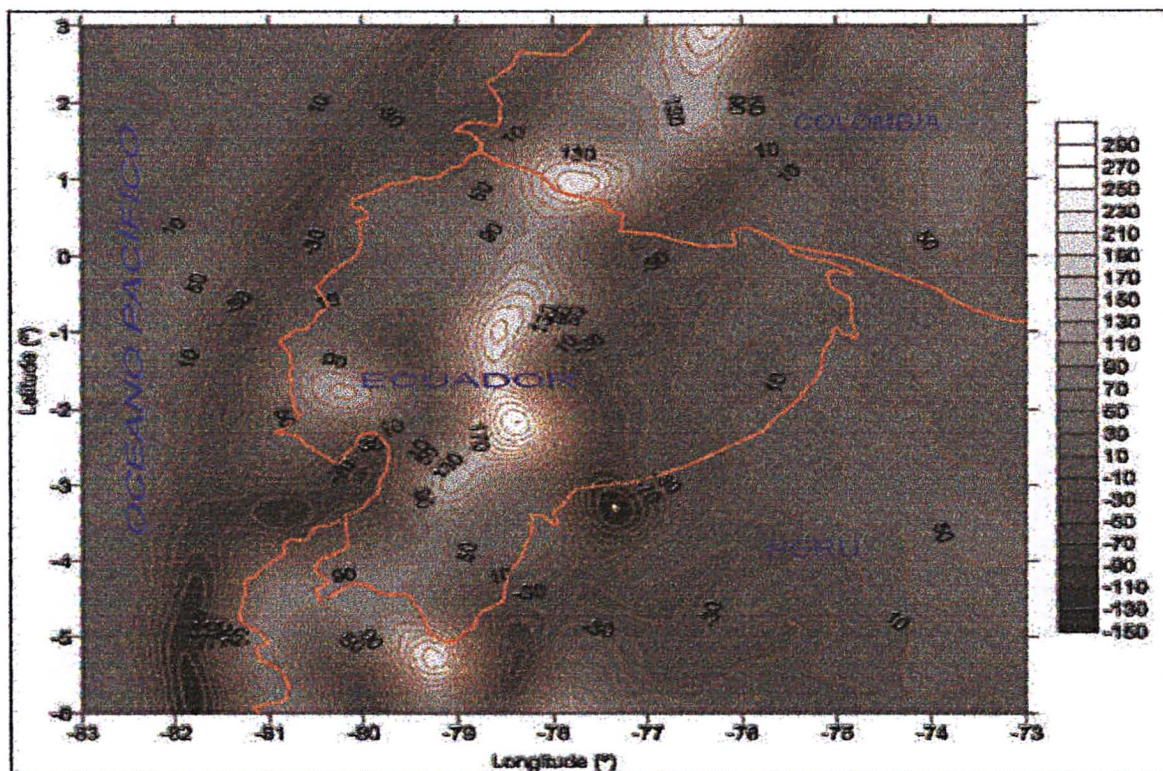
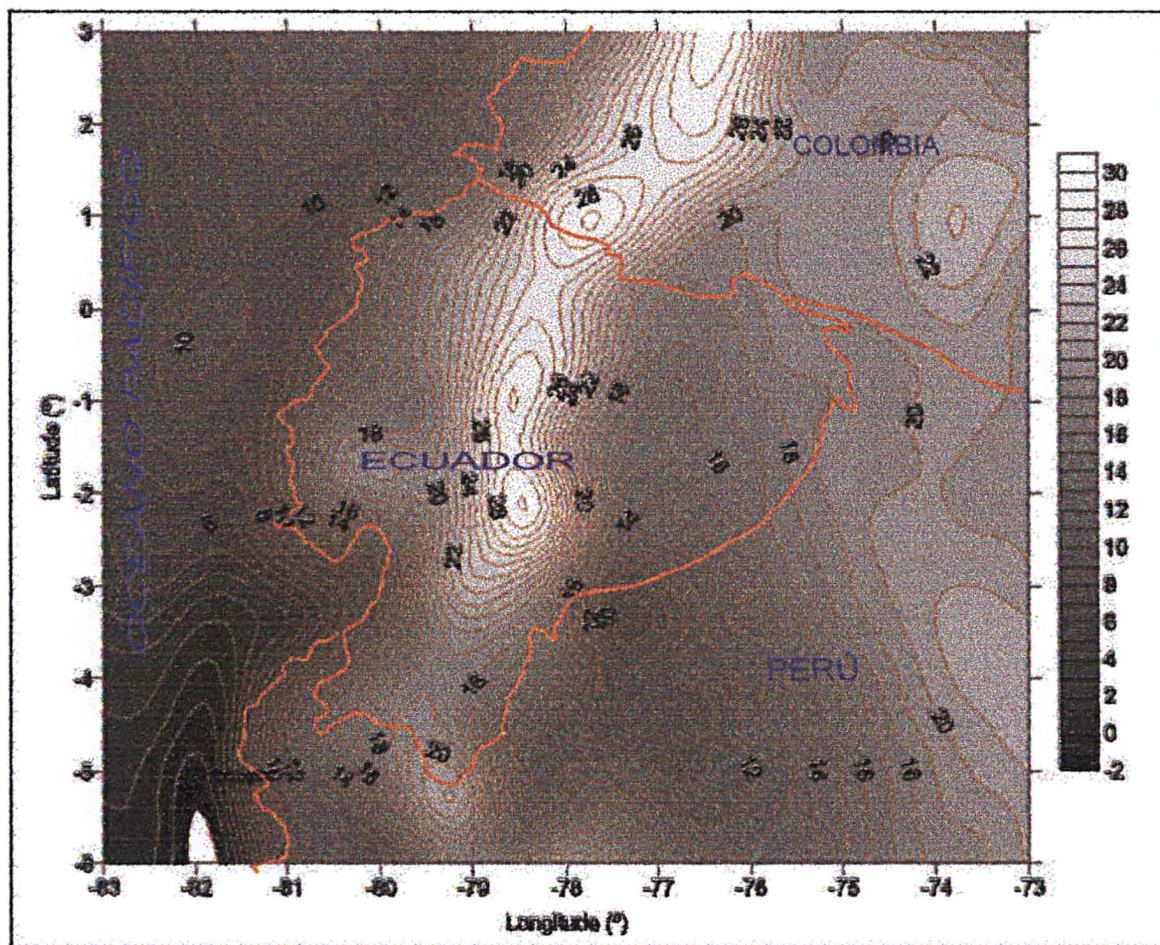




FIGURA 4.2. ONDULAÇÃO GEOIDAL OBTIDA DO EGM96 COM MALHA DE 5km  
(intervalo de contorno: 1m)



Os valores mínimo e máximo das anomalias de ar-livre e das ondulações geoidais obtidas são fornecidas na tabela 4.3.

TABELA 4.3. VALORES DE ANOMALIA AR-LIVRE E ONDULAÇÕES GEOIDAIS EM  
INTERVALOS DE 5 km x 5 km

| VALORES | ANOMALIAS AR-LIVRE<br>(mGal) | ONDULAÇÕES GEOIDAIS<br>(m) |
|---------|------------------------------|----------------------------|
| Mínimo  | -150,62                      | -2,44                      |
| Máximo  | 290,63                       | 30,13                      |



A figura 4.3 e a figura 4.4, mostram a anomalia de ar-livre e as ondulações geoidais obtidas do EGM96 para um intervalo ou malha de 5' x 5', aproximadamente 10 km. Totalizaram 13189 valores, correspondendo a uma matriz de 121 x 109 elementos.

FIGURA 4.3. ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDA DO EGM96 COM MALHA DE 10km  
(intervalo de contorno: 20 mGal)

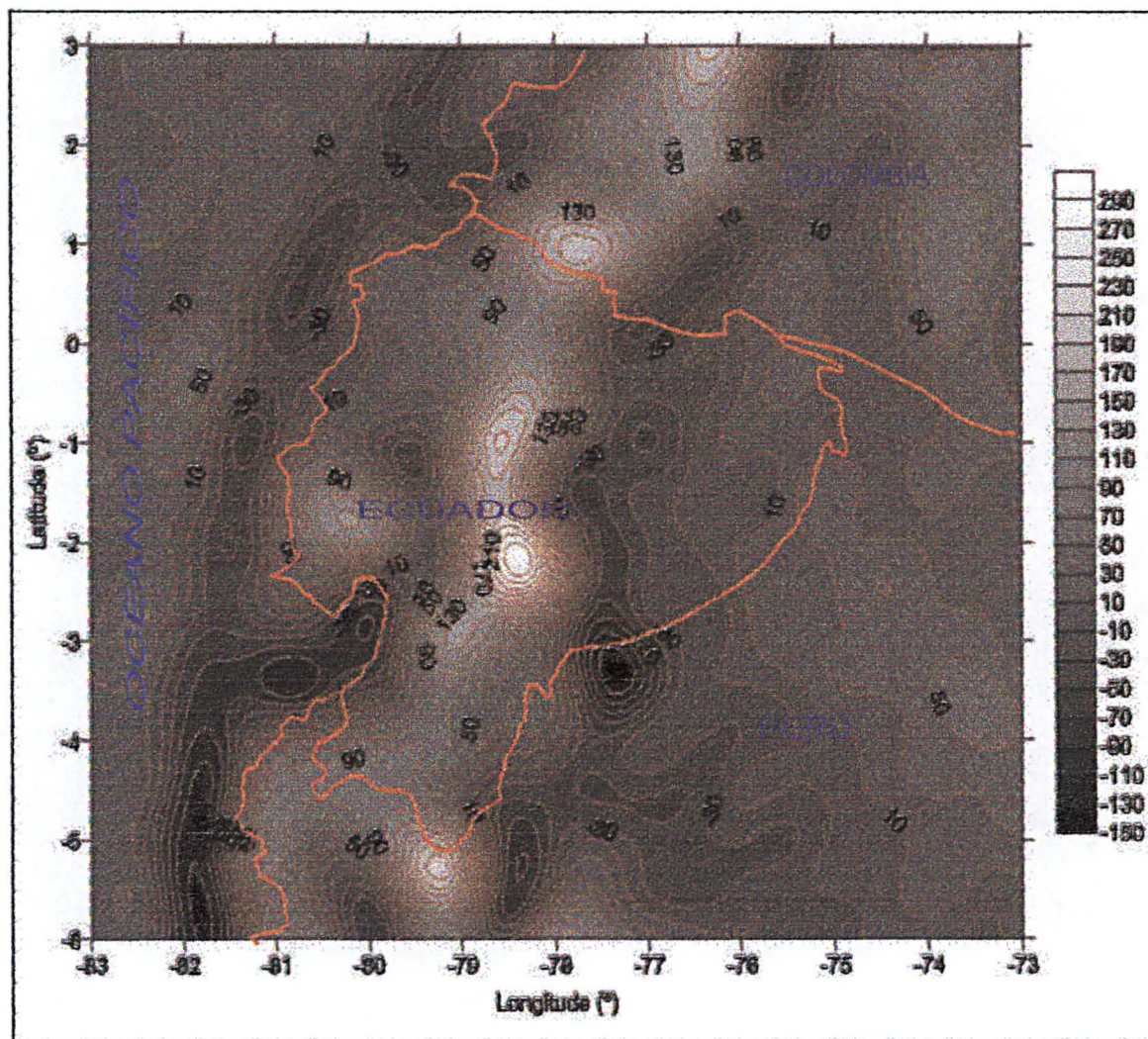
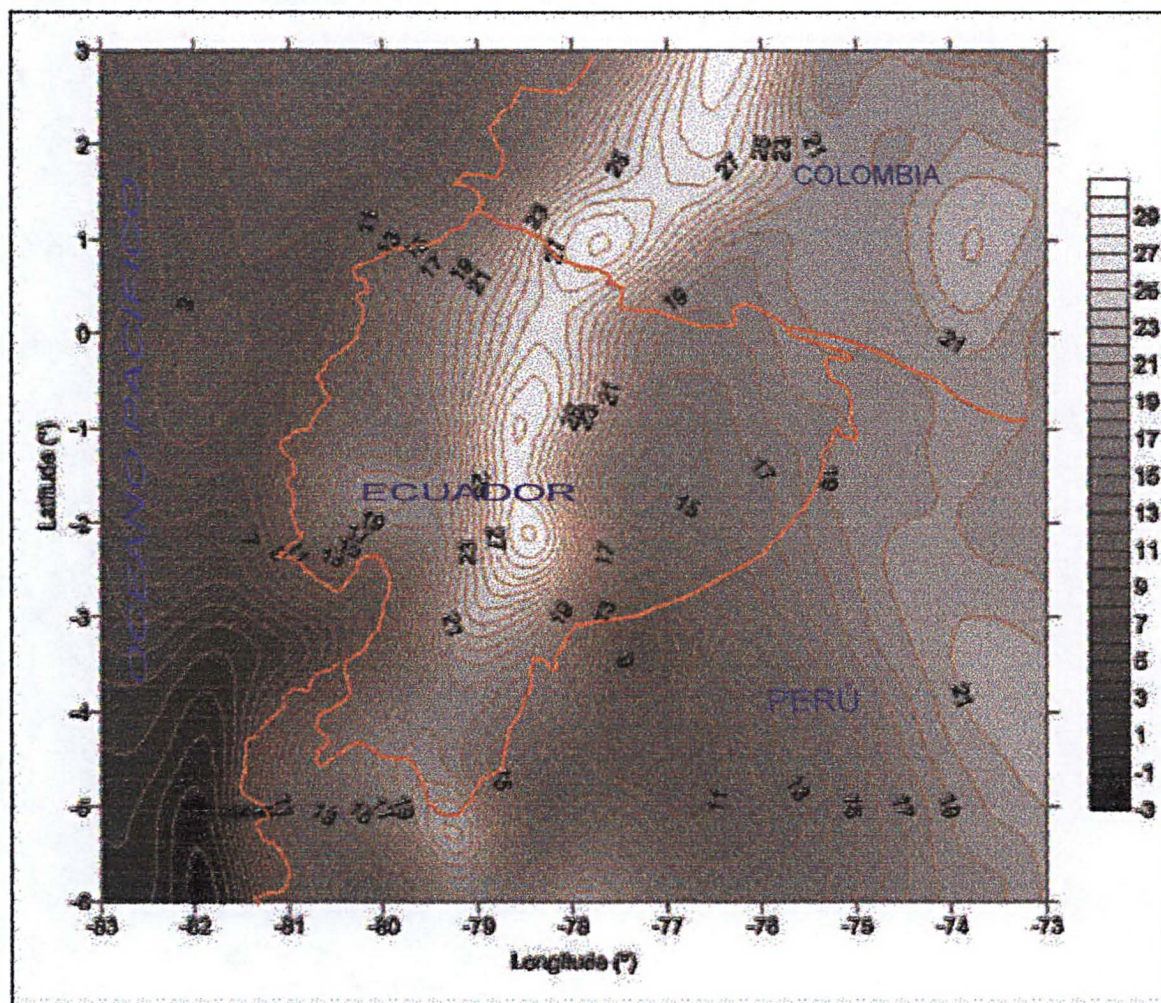




FIGURA 4.4. ONDULAÇÃO GEOIDAL OBTIDA DO EGM96 COM MALHA DE 10km  
(intervalo de contorno: 1m)



Os valores mínimo e máximo das anomalias de ar-livre e das ondulações geoidais obtidas do EGM96 são fornecidas na tabela 4.4.

TABELA 4.4. VALORES DE ANOMALIA AR-LIVRE E ONDULAÇÕES GEOIDAIIS EM  
INTERVALOS DE 10km x 10 km

| VALORES | ANOMALIAS AR-LIVRE<br>(mGal) | ONDULAÇÕES GEOIDAIIS<br>(m) |
|---------|------------------------------|-----------------------------|
| Mínimo  | -150,24                      | -2,44                       |
| Máximo  | 288,54                       | 30,12                       |



A figura 4.5 e a figura 4.6, mostram a anomalia de ar-livre e as ondulações geoidais obtidas do EGM96 para um intervalo ou malha de 7.5' x 7.5', aproximadamente 15 km. Totalizaram 5913 valores, correspondendo a uma matriz de 81 x 73 elementos.

FIGURA 4.5. ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDA DO EGM96 COM MALHA DE 15km  
(intervalo de contorno: 20 mGal)

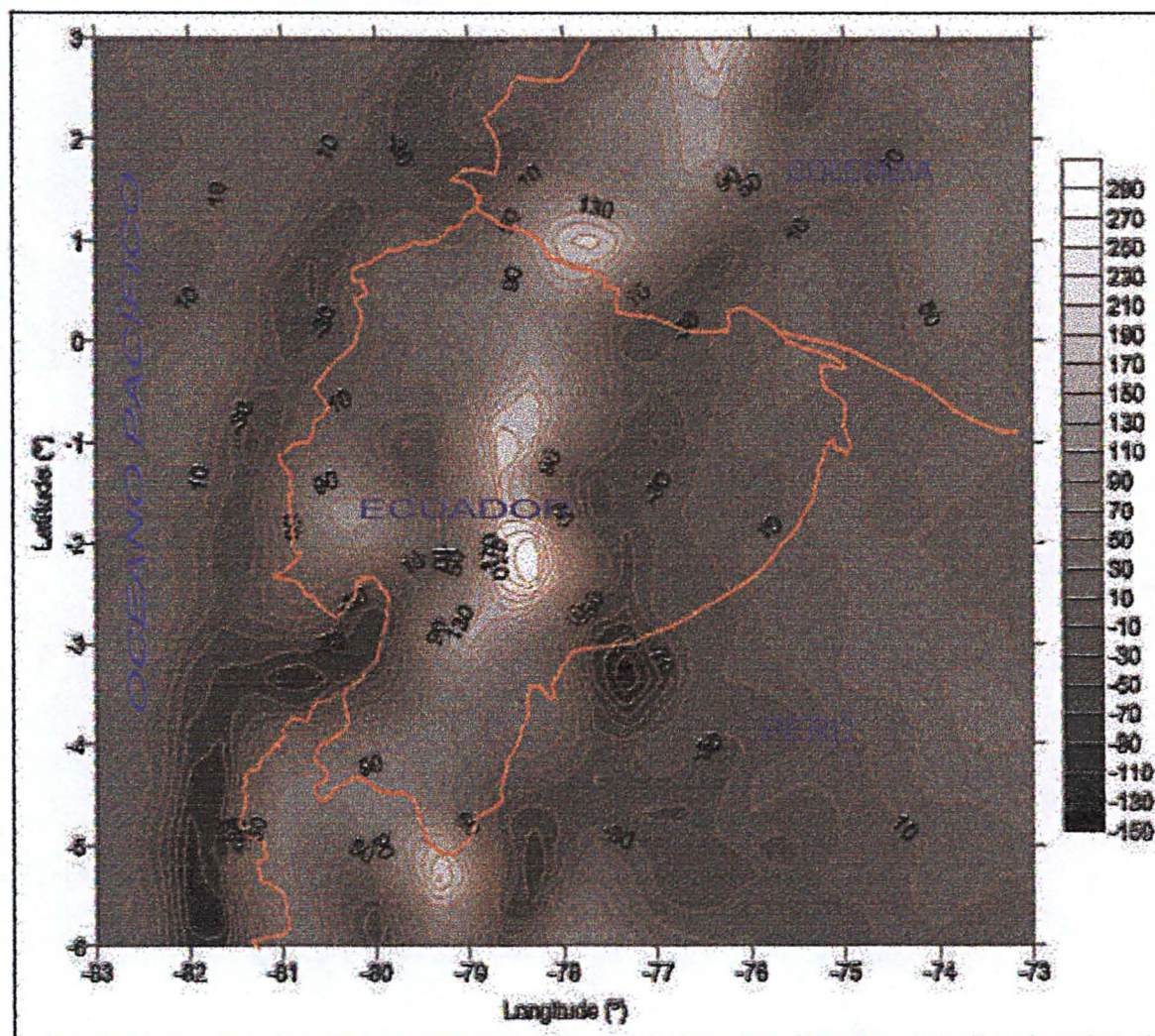
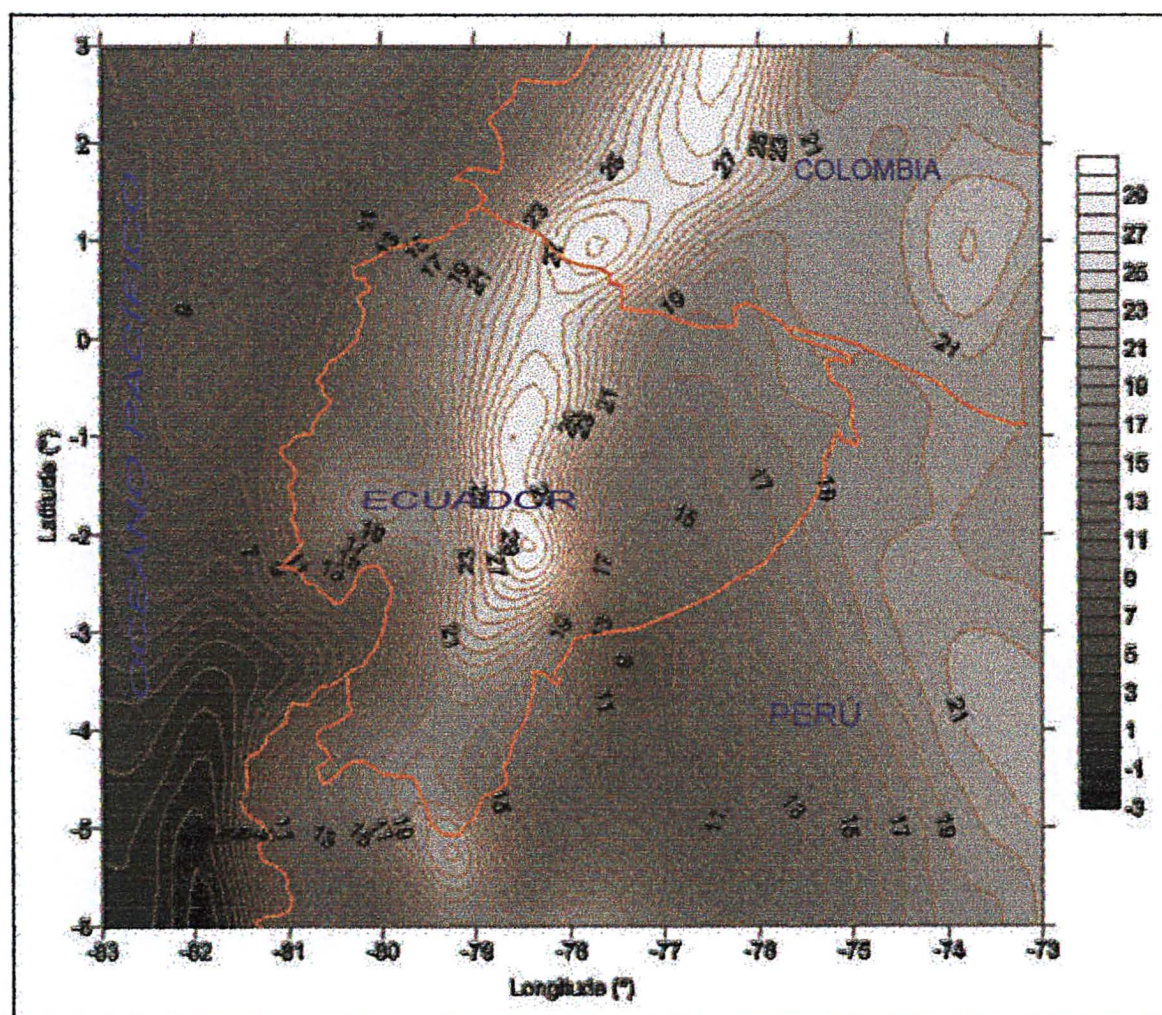




FIGURA 4.6. ONDULAÇÃO GEOIDAL OBTIDA DO EGM96 COM MALHA DE 15km  
(intervalo de contorno: 1m)



Os valores mínimo e máximo das anomalias de ar-livre e das ondulações geoidais obtidas do EGM96 são fornecidas na tabela 4.5.

TABELA 4.5. VALORES DA ANOMALIA AR-LIVRE E ONDULAÇÕES GEOIDAIAS EM  
INTERVALOS DE 15 km x 15 km

| VALORES | ANOMALIAS AR-LIVRE<br>(mGal) | ONDULAÇÕES GEOIDAIAS<br>(m) |
|---------|------------------------------|-----------------------------|
| Mínimo  | -150,24                      | -2,41                       |
| Máximo  | 288,54                       | 30,09                       |



A figura 4.7 e a figura 4.8, mostram a anomalia de ar-livre e as ondulações geoidais obtidas do EGM96 para um intervalo ou malha de 10' x 10', aproximadamente 20 km. Totalizaram 3294 valores, correspondendo a uma matriz de 31 x 28 elementos.

FIGURA 4.7. ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDA DO EGM96 COM MALHA DE 20km  
(intervalo de contorno: 20 mGal)

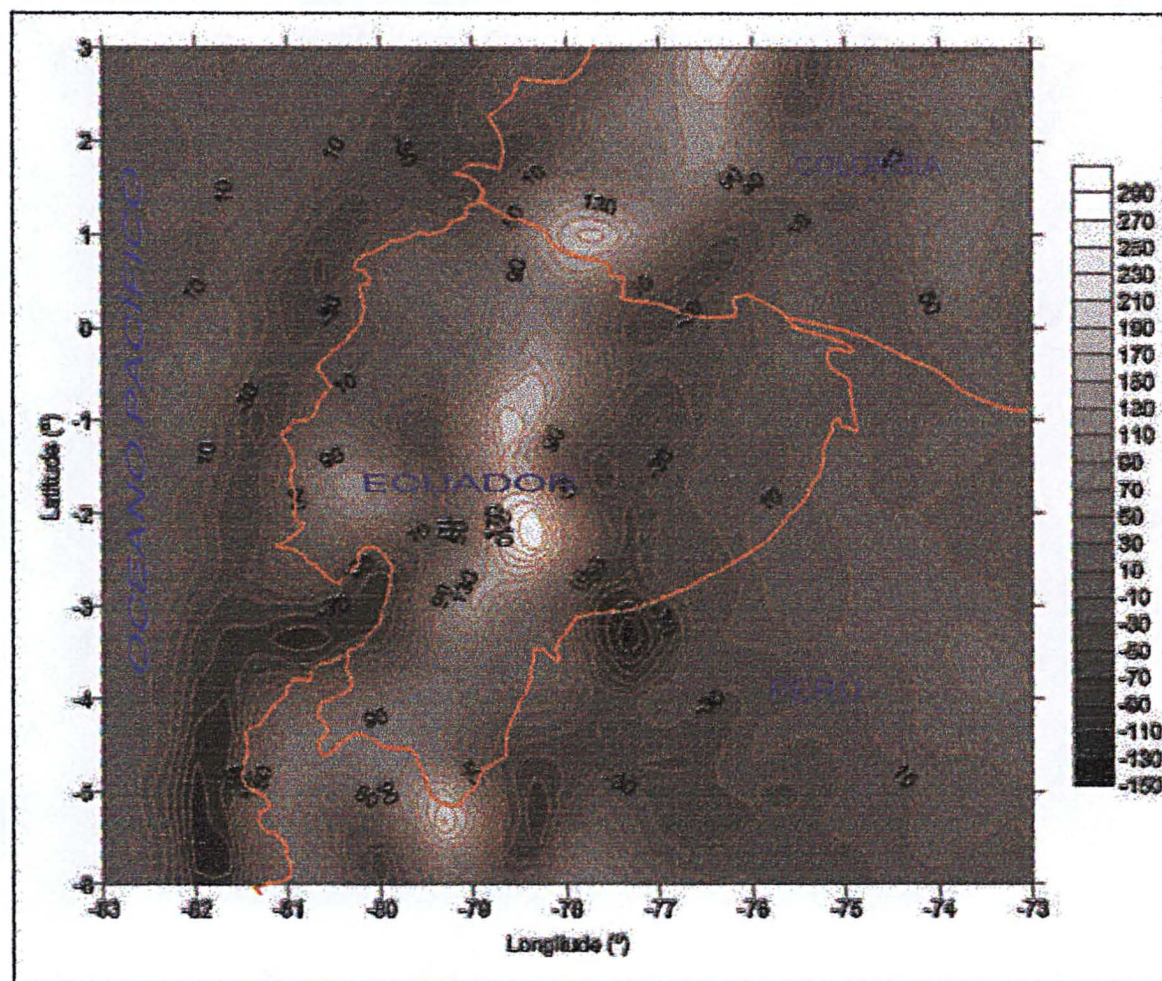
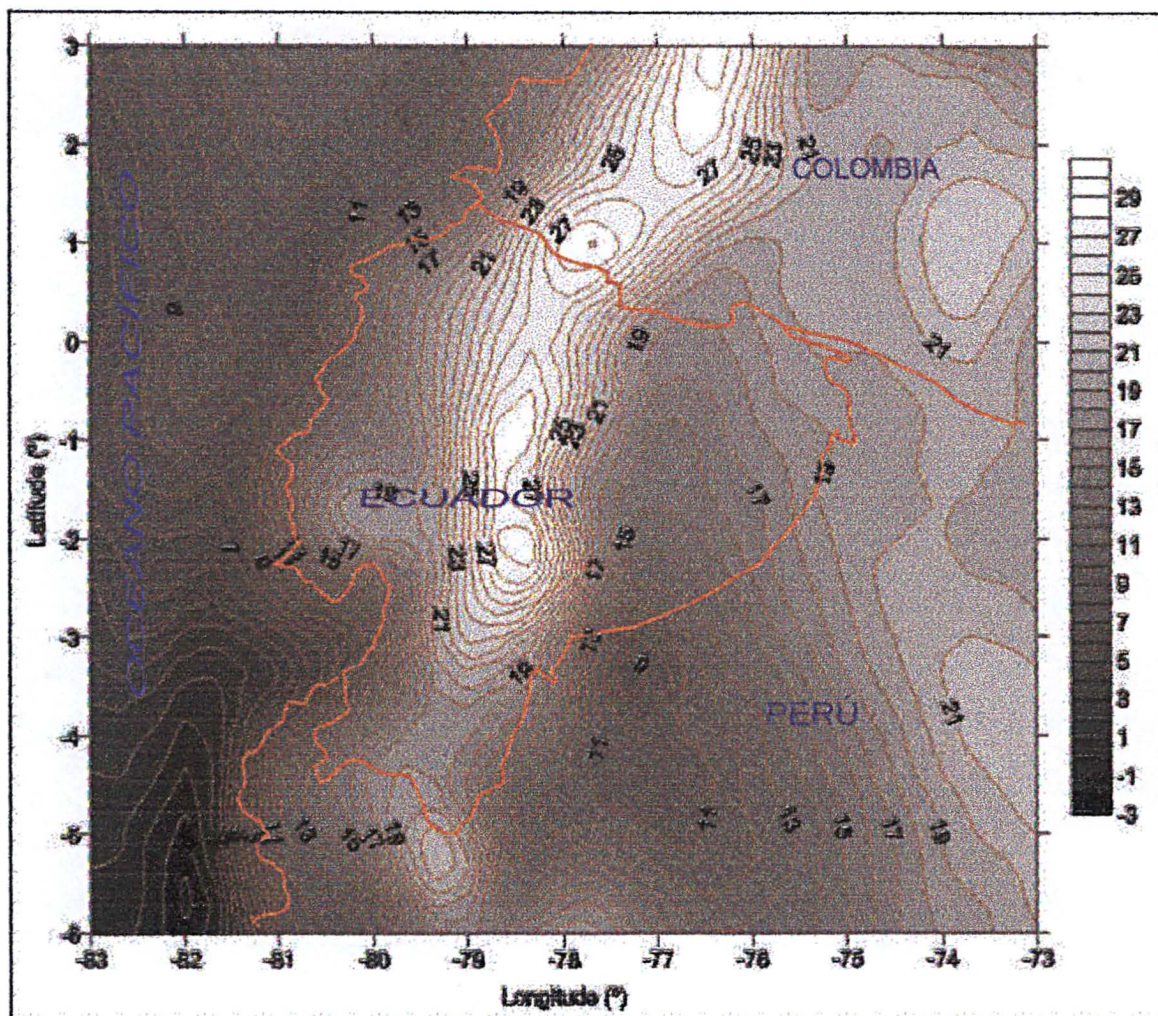




FIGURA 4.8. ONDULAÇÃO GEOIDAL OBTIDA DO EGM96 COM MALHA DE 20km  
(intervalo de contorno: 1m)



Os valores mínimo e máximo das anomalias de ar-livre e das ondulações geoidais obtidas do EGM96 são fornecidas na tabela 4.6.

TABELA 4.6. VALORES DE ANOMALIA AR-LIVRE E ONDULAÇÕES GEOIDAIS EM INTERVALOS DE 20 km x 20 km

| VALORES | ANOMALIAS AR-LIVRE<br>(mGal) | ONDULAÇÕES GEOIDAIS<br>(m) |
|---------|------------------------------|----------------------------|
| Mínimo  | -149,15                      | -2,32                      |
| Máximo  | 286,38                       | 30                         |



## 4.2 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DAS ANOMALIAS DO AR LIVRE E BOUGUER

Com os dados gravimétricos finais (os que foram mantidos após a detecção de erros e dados duplicados), procedeu-se ao processamento com o objetivo de gerar uma base de dados gravimétricos (BDG).

### 4.2.1 Cálculo da Anomalia do Ar-Livre

Para calcular a correção de ar-livre referida ao sistema WGS84(G873), foram usadas as equações (2.35) (2.36) e (2.37), que para latitudes equatoriais pode ser sintetizada como:

$$C_{AL} = 0.30771Hn - 0.000000072Hn^2 \quad (4.1)$$

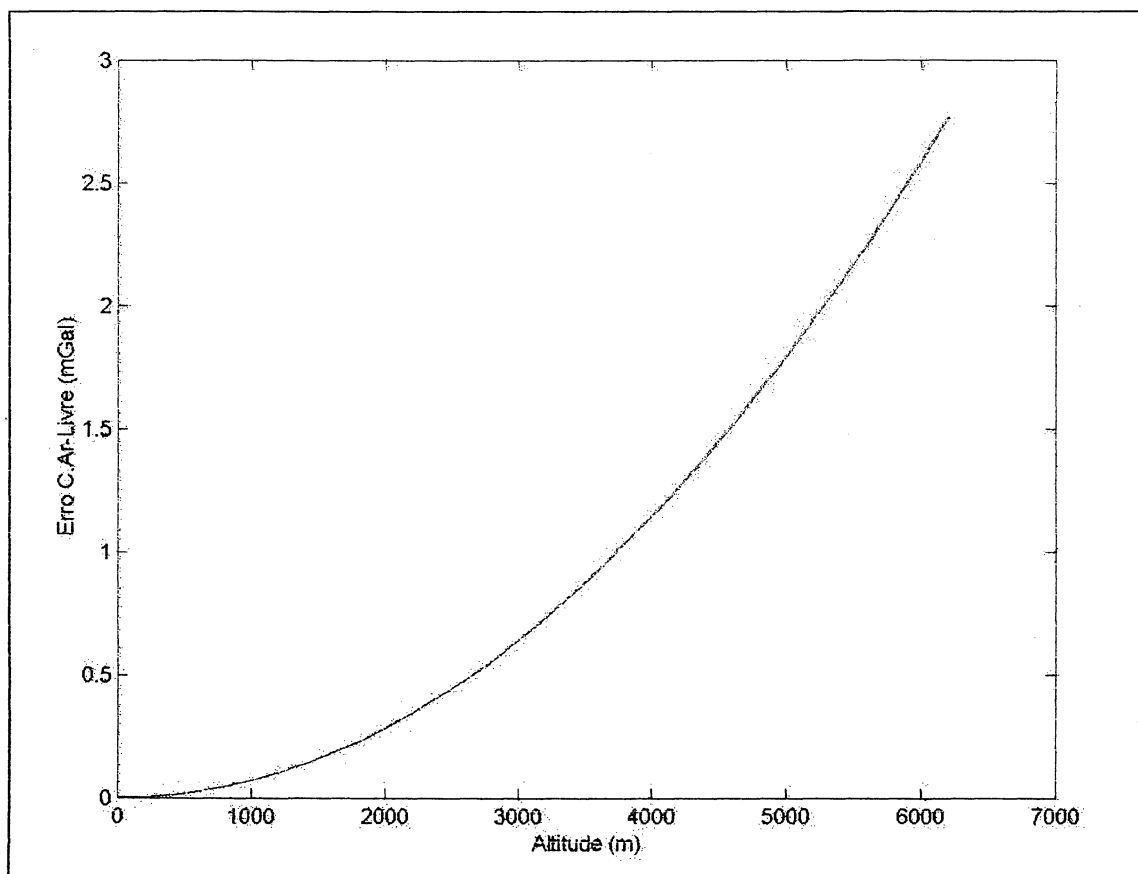
com

$Hn$  em metros

$C_{AL}$  em miligals.

A área de estudo tem uma variação de altitude muito grande devido à presença dos Andes, podendo chegar aproximadamente até 6300 m de altitude (seção 3.2). Devido a estes valores de altitudes, o segundo termo do segundo membro da equação (4.1) tem que ser considerado. A figura 4.9, mostra o erro que pode ser cometido no caso de não se considerar o segundo termo. Assim por exemplo, a uma altitude de 2700 m, o erro é de 0,5 mGal e a 3700 m é de 1 mGal, aproximadamente.

FIGURA 4.9. ERRO NA CORREÇÃO DE AR-LIVRE PELO SEGUNDO TERMO



A gravidade teórica, no sistema WGS84(G783), foi calculada com as equações (2.13) e (2.14). A anomalia de ar-livre, para cada estação terrestre, foi calculada de acordo com a equação (2.38).

#### 4.2.2 Cálculo da Anomalia de Bouguer

No cálculo da anomalia de Bouguer foi usada a equação (2.39). Nesta equação a correção do terreno foi calculada mediante integração numérica por prismas (seção 2.1.5.2), ficando:

$$\Delta g_B = \Delta g_{AL} - 2\pi G \bar{\rho} H n + C_T \quad (4.2)$$

Para calcular o valor da densidade média nas estações, foi treinada uma RNA com o objetivo de gerar o MDD (seção 4.3.1). Os valores das densidades médias mostrados na tabela 4.7 foram classificados em 8 classes. Estes valores foram obtidos de acordo a seção 3.4:

TABELA 4.7. CLASSIFICAÇÃO DAS DENSIDADES EM CLASSES

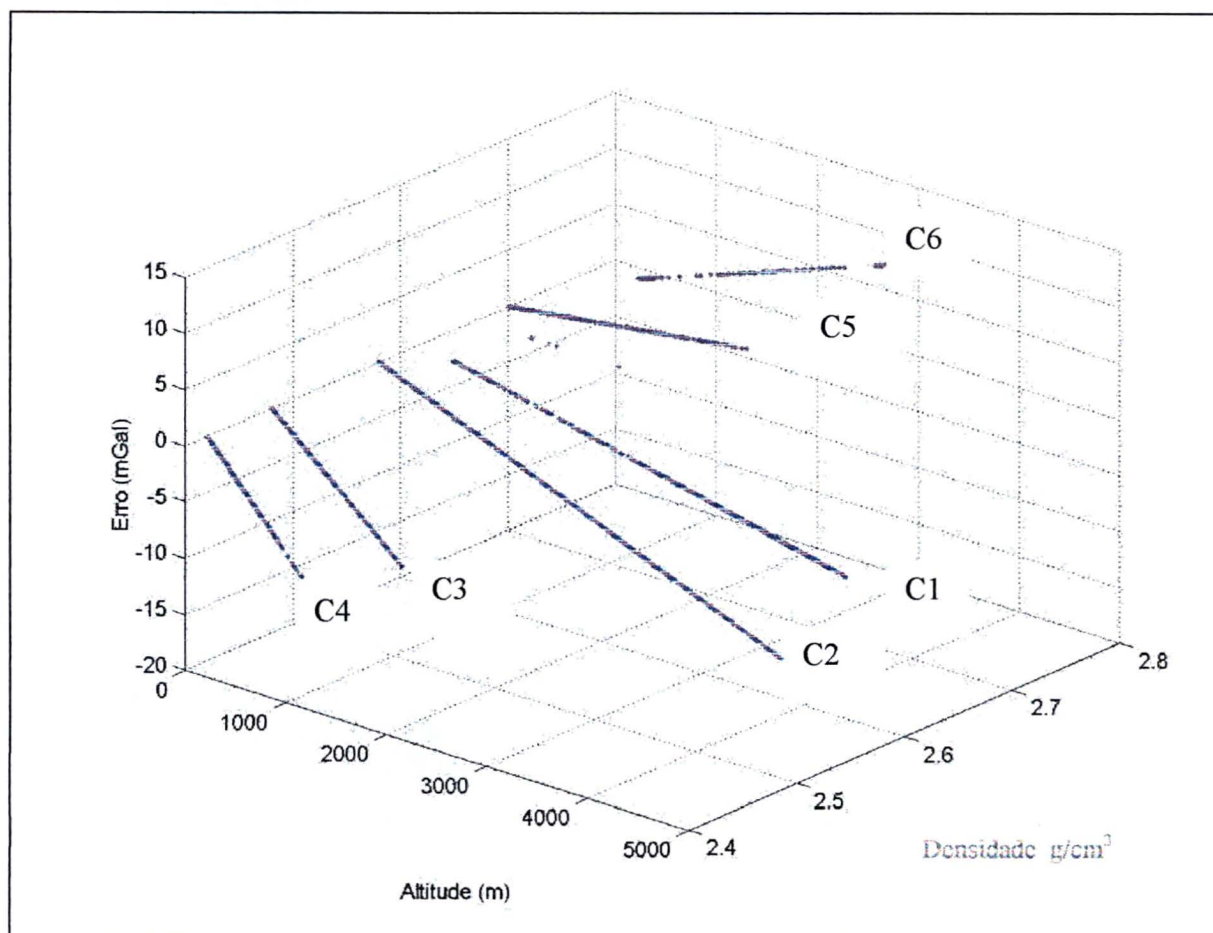
| VALOR DE DENSIDADE<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | CLASSE |
|--|--------|
| 2,62                                       | C1     |
| 2,58                                       | C2     |
| 2,48                                       | C3     |
| 2,42                                       | C4     |
| 2,70                                       | C5     |
| 2,75                                       | C6     |
| 1,027                                      | C7     |
| 2,67                                       | C8     |

A RNA treinada foi usada para prever a densidade média em cada estação gravimétrica, e finalmente calcular a correção devido ao platô de Bouguer (segundo termo da equação (4.2)). Os valores da densidade estão compreendidos entre 2,42 g/cm<sup>3</sup> e 2,75 g/cm<sup>3</sup>. O valor 1,027 g/cm<sup>3</sup> da classe 7 (C7) é o valor da densidade média da água salgada.

A diferença encontrada na área de estudo na correção do platô de Bouguer, quando se usa a densidade média e não a densidade de 2,67 g/cm<sup>3</sup>, tem uma variação desde -15 mGal até 11 mGal.

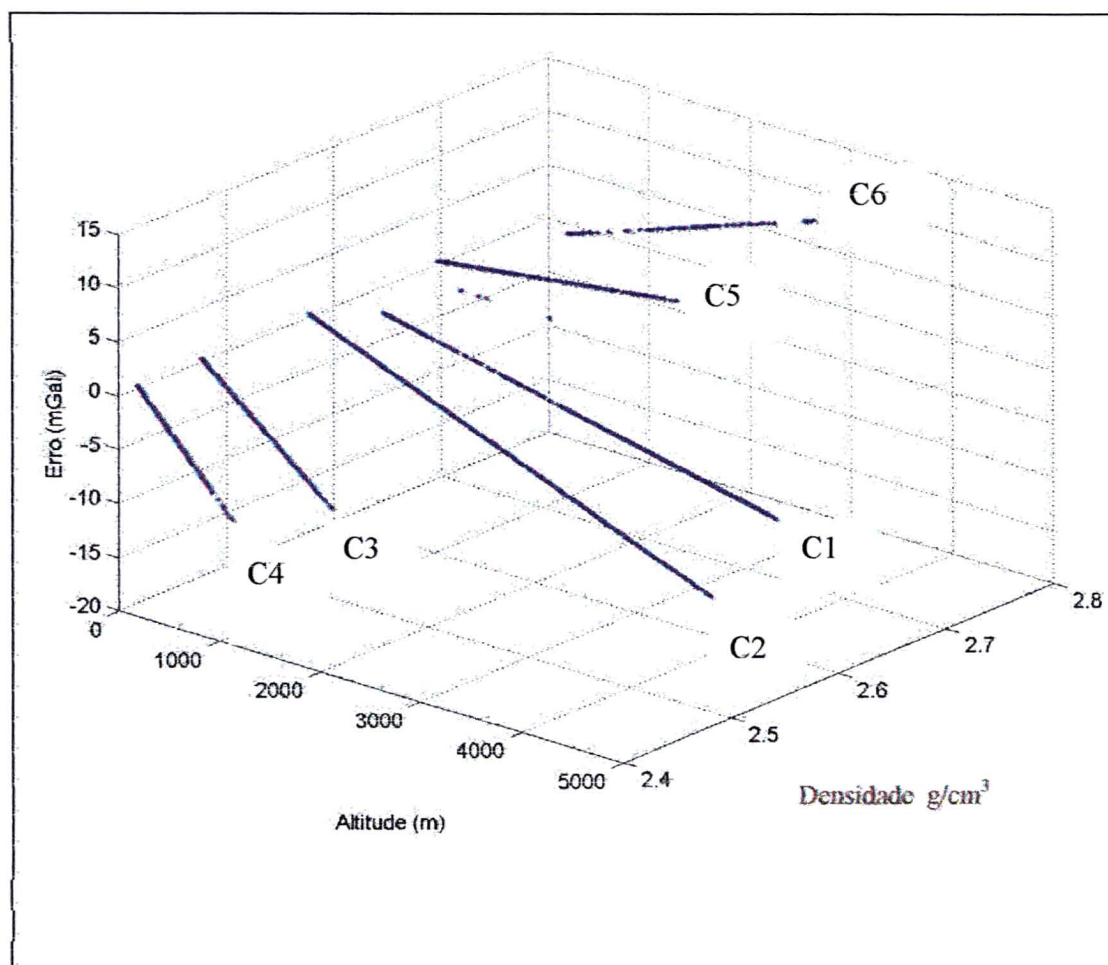
Esta diferença (a qual obviamente origina erros) é significativa, devendo ser considerada no cálculo da anomalia de Bouguer. A figura 4.10, mostra o erro (em mGal) existente no platô de Bouguer com relação à altitude (em metros), e a densidade em g/cm<sup>3</sup>.

FIGURA 4.10. ERRO NO PLATÔ DE BOUGUER DEVIDO A DENSIDADE



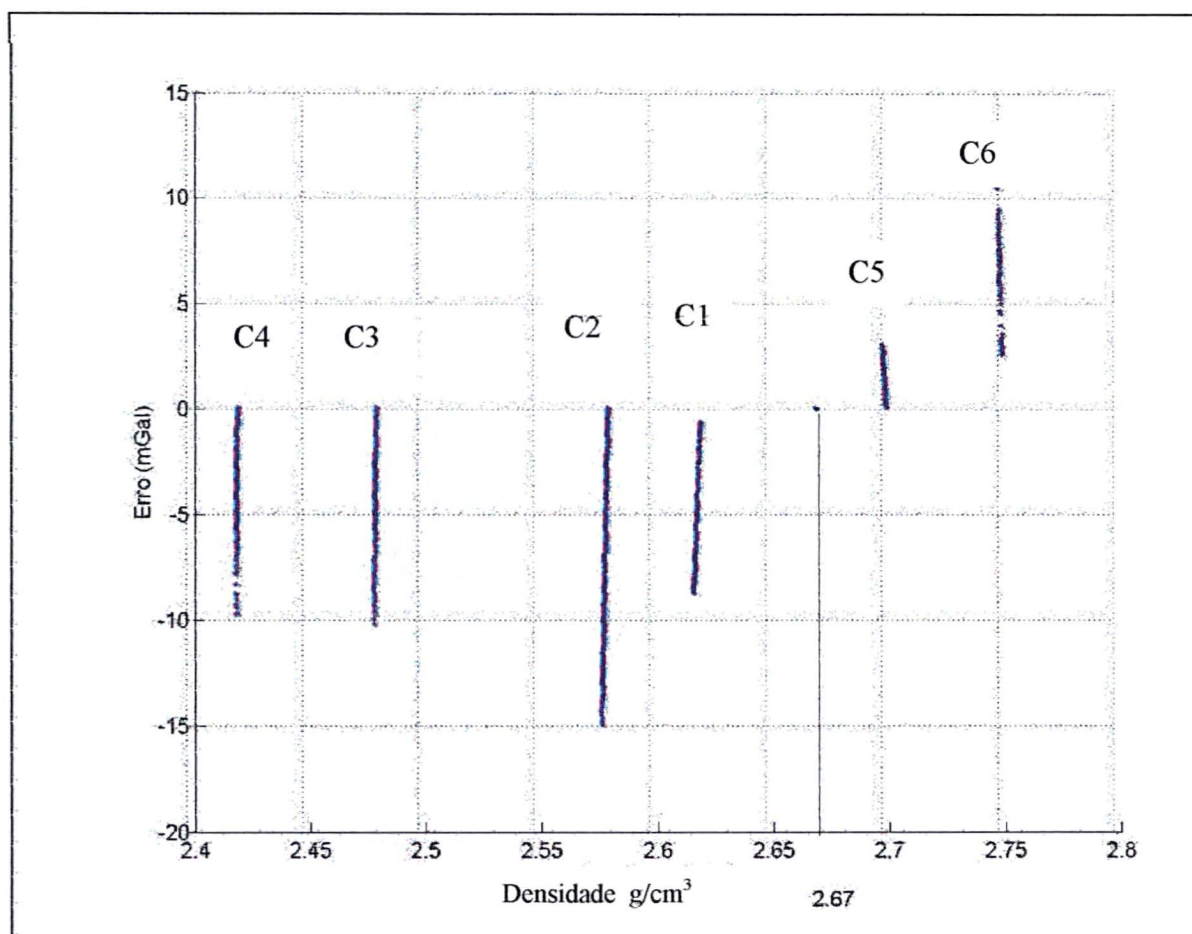
A figura 4.11, mostra o comportamento do erro quando varia a altitude. Na área de estudo foram encontradas muito mais regiões com densidades menores que  $2,67 \text{ g/cm}^3$  que maiores que esta. Pode-se observar nesta figura a tendência de espalhamento do erro da correção do platô de Bouguer com as densidade médias em relação à densidade de  $2,67 \text{ g/cm}^3$ . A amplitude encontrada é de aproximadamente de 26 mGal.

FIGURA 4.11. ERRO NO PLATÔ DE BOUGUER EM RELAÇÃO À ALTITUDE



Na figura 4.12, se mostra o erro no platô de Bouguer em relação à variação da densidade. Nesta figura, pode-se notar que quando se têm valores de densidades menores que  $2,67 \text{ g/cm}^3$ , o erro cometido pode chegar a  $-15 \text{ mGal}$ . Enquanto que, para valores de densidades maiores o erro pode chegar até  $10 \text{ mGal}$ .

FIGURA 4.12. ERRO NO PLATÔ DE BOUGUER EM RELAÇÃO À DENSIDADE



O resumo dos resultados das diferenças obtidas no cálculo da correção gravimétrica devido ao platô do Bouguer determinada com a densidade conhecida e a densidade de  $2,67 \text{ g/cm}^3$  é mostrado na tabela 4.8, mediante a média, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo.

TABELA 4.8. DIFERENÇAS NO PLATÔ DE BOUGUER DEVIDO À DENSIDADE

|               | VALORES EM mGal |
|---------------|-----------------|
| Média         | 3,31            |
| Desvio padrão | 3,01            |
| Mínimo        | -15             |
| Máximo        | 11              |

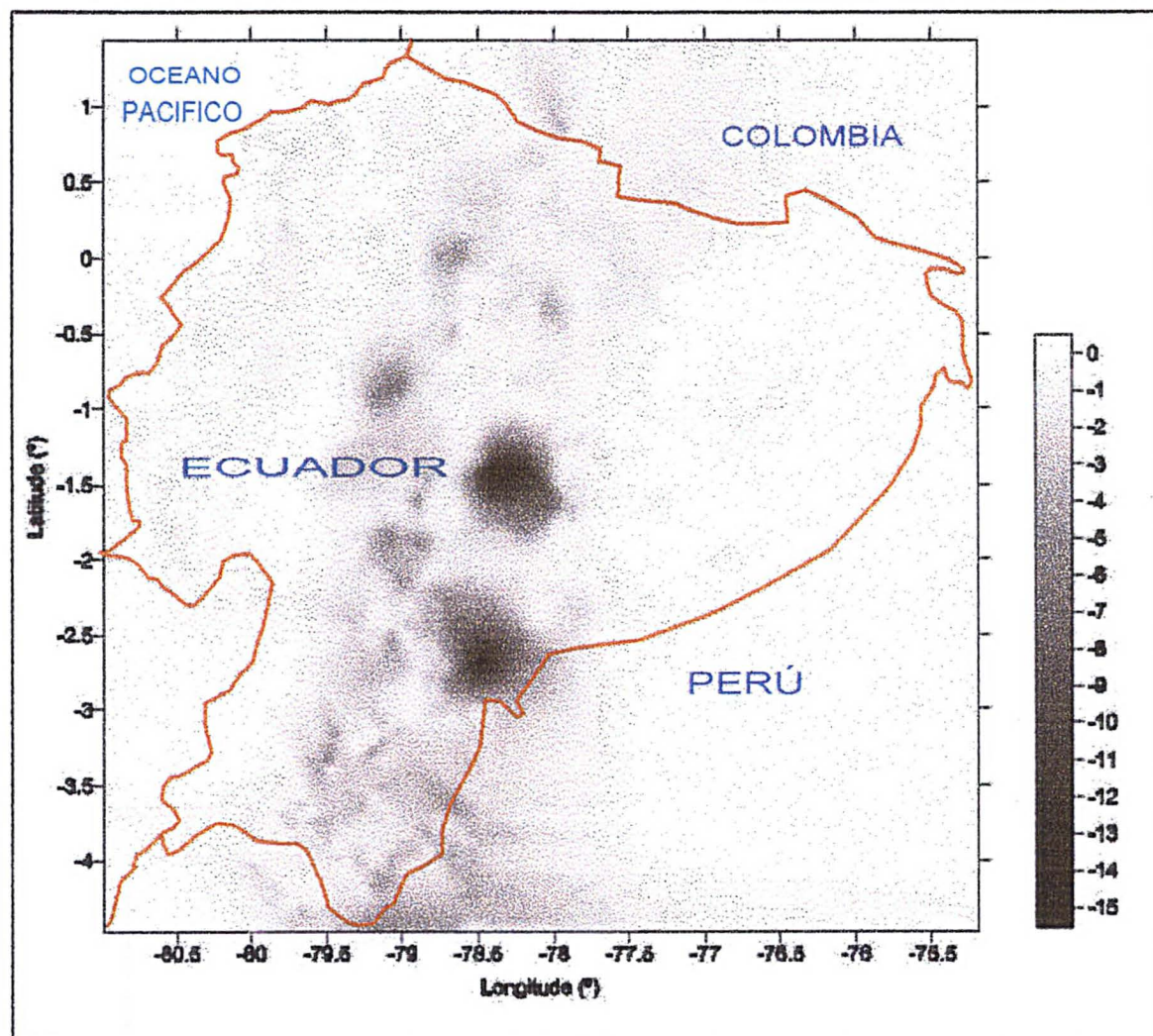
Tanto a presença de elementos de massa acima do platô de Bouguer, quanto sua ausência abaixo do mesmo, geram uma redução da gravidade real na estação gravimétrica, sendo seu efeito (correção do terreno) corrigido sempre por valores positivos. Para determinar os valores da correção do terreno, terceiro termo da equação (4.1), foi necessário criar duas malhas topográficas, com espaçamento de dados de 30" x 30" e 1' x 1', a fim de serem incluídas como entrada no programa **tc** (FOSBERG, 1994, apud Escola do Geóide, IAG/IBGE, 1997). Como a influência das massas é tanto mais intensa quanto mais próximas estas se encontram da estação, foi necessário fazer a integração com um raio interno de 5 km usando a malha mais densa (30" x 30"), e com um raio externo até 167 km usando a malha menos densa (1' x 1').

Também a correção do terreno foi calculada com um valor de densidade 2,5 g/cm<sup>3</sup>, como valor médio da área de estudo. Esta densidade média foi determinada a partir das densidades médias obtidas do MDD, e foi utilizada na equação (2.42) (seção 2.1.5.2).

A diferença encontrada na correção do terreno quando se usa o valor da densidade de 2,5 g/cm<sup>3</sup> em relação à densidade de 2,67 g/cm<sup>3</sup>, foi de até -16 mGal, com média de -0,84 mGal e desvio padrão de 1,44 mGal. A figura 4.13, mostra as diferenças obtidas na área de estudo, e se pode observar que a maiores diferenças encontram-se na parte das altas montanhas.



FIGURA 4.13. DIFERENÇAS NA CORREÇÃO DO TERRENO (em mGal) DEVIDO À DENSIDADE



Os valores da correção do terreno chegam até 99,95 mGal. A tabela 4.9, mostra o resumo dos resultados obtidos.

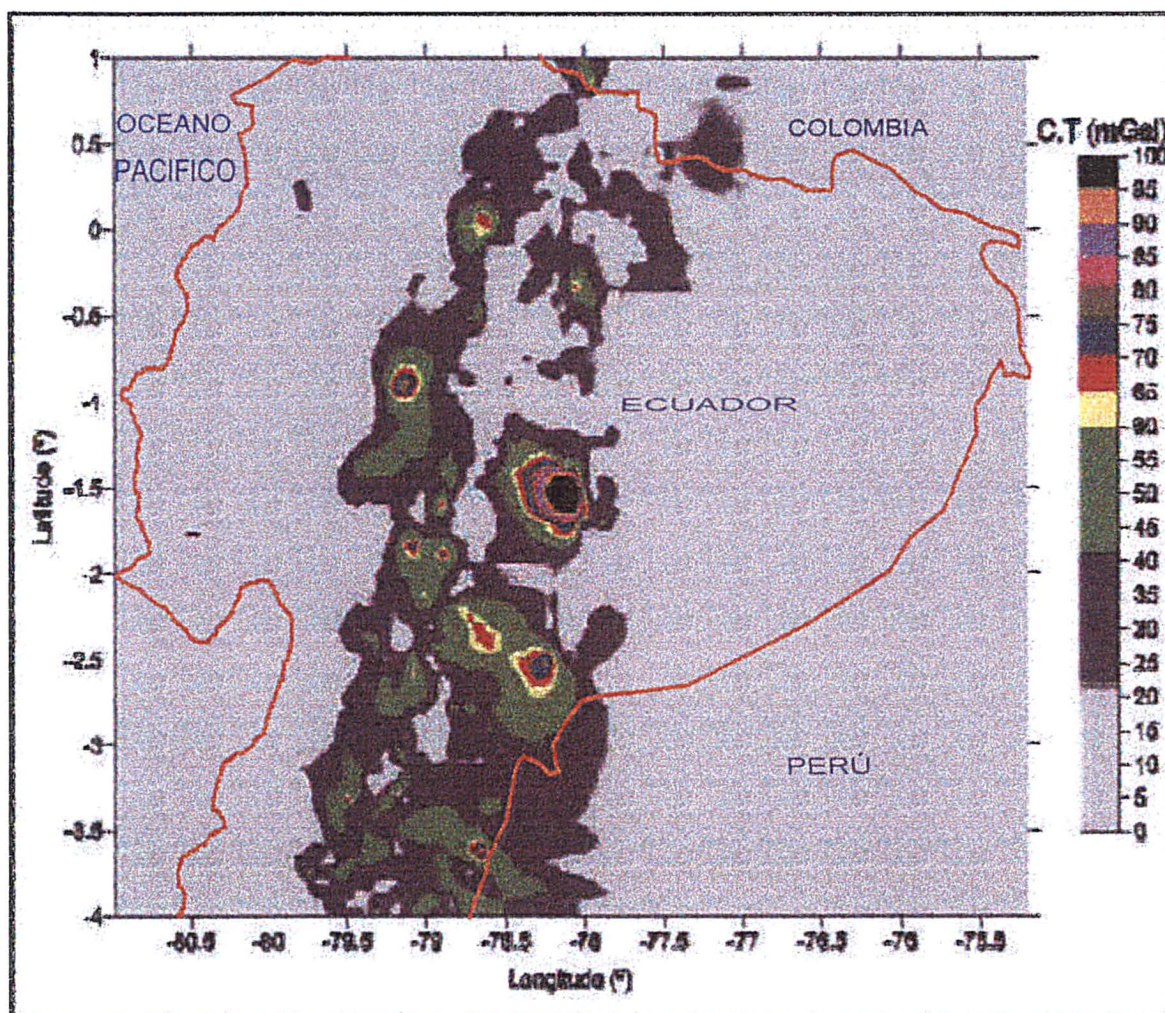
TABELA 4.9. RESULTADOS DAS CORREÇÕES DO TERRENO

|               | VALORES EM mGal |
|---------------|-----------------|
| Média         | 10,21           |
| Desvio padrão | 12,56           |
| Mínimo        | 0               |
| Máximo        | 99,95           |



A figura 4.14, mostra o gráfico da correção do terreno obtida na área de estudo

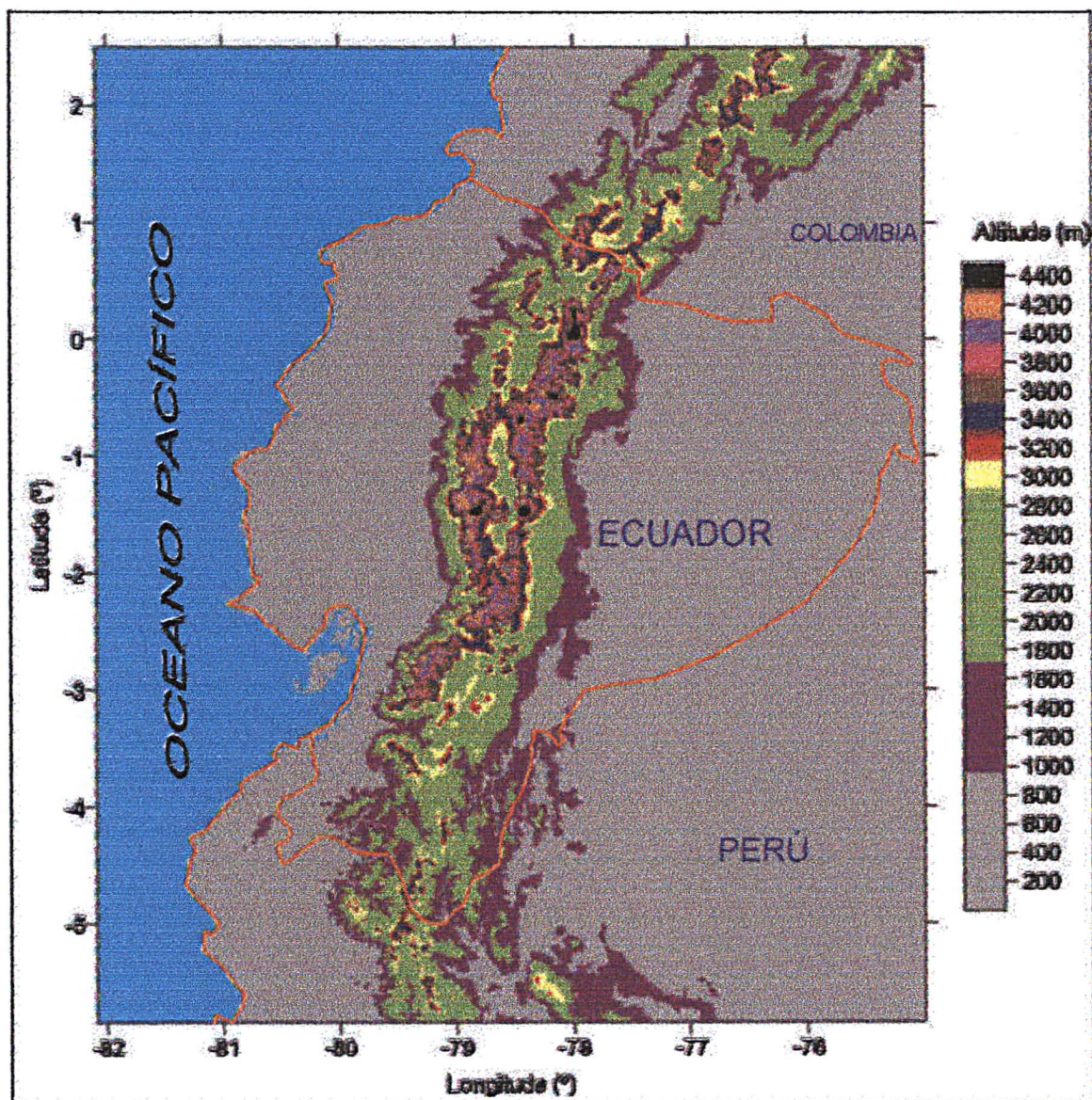
FIGURA 4.14. GRÁFICO DA CORREÇÃO DO TERRENO



A figura 4.15, mostra os valores das altitudes dos pontos com dados gravimétricos. Na mesma figura, pode-se ver que existe um gradiente muito forte na topografia ao longo dos Andes (altas montanhas). Observando a figura 4.15, observam-se valores da correção do terreno maiores a 60 mGal quando as altitudes são maiores de 3000 m, aproximadamente.



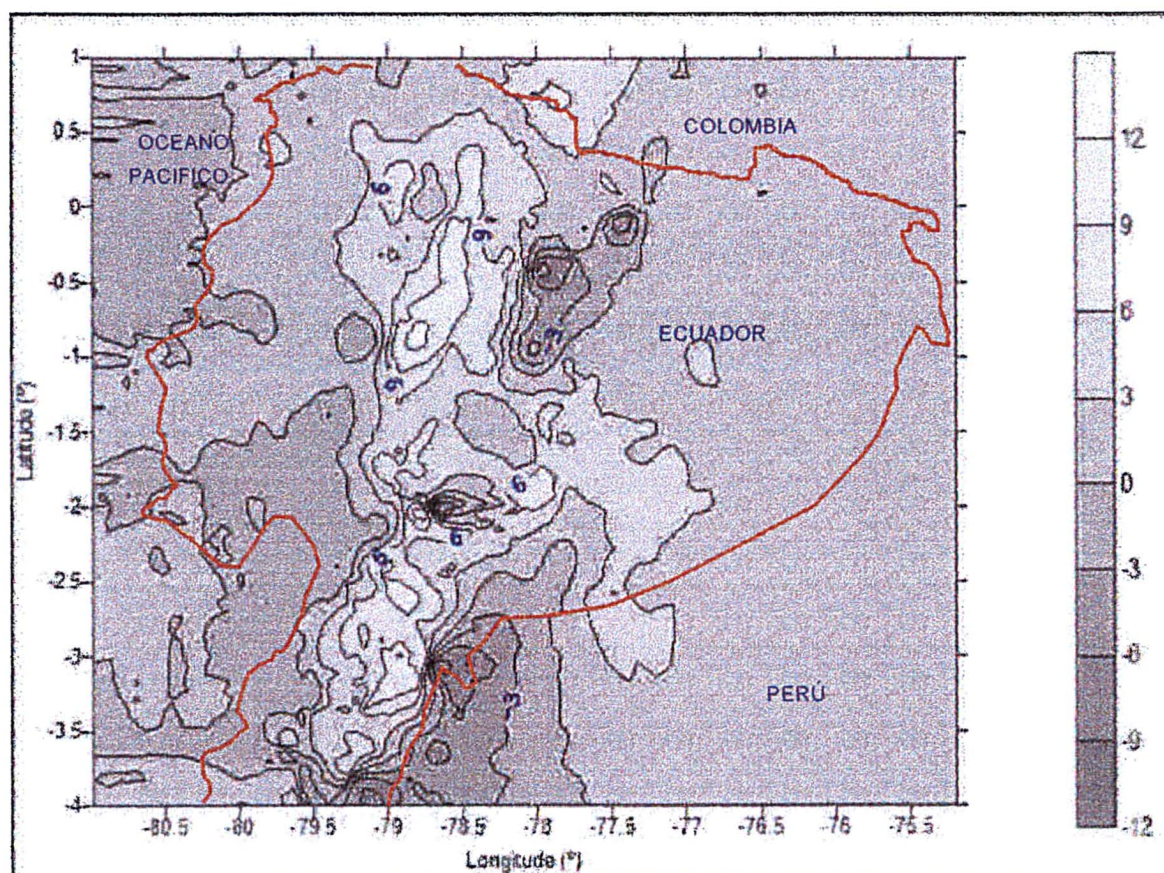
FIGURA 4.15. GRÁFICO DAS ALTITUDES DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS



A anomalia de Bouguer (equação 4.2) foi calculada considerando a densidade média da camada geológica para o platô de Bouguer, e o valor da densidade média da área de  $2,5 \text{ g/cm}^3$  para a correção do terreno. A figura 4.16, mostra as diferenças obtidas na anomalia de Bouguer (em mGal) calculada com a densidade média e as calculadas com a densidade de  $2,67 \text{ g/cm}^3$ .



FIGURA 4.16. DIFERENÇAS NA ANOMALIA BOUGUER (mGal) DEVIDO À DENSIDADE



A tabela 4.10, mostra o resumo das diferenças obtidas na anomalia de Bouguer devido à densidade, mediante a média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo.

TABELA 4.10. DIFERENÇAS NA ANOMALIA DE BOUGUER DEVIDO À DENSIDADE

|               | VALORES EM mGal |
|---------------|-----------------|
| Média         | 2,61            |
| Desvio padrão | 2,91            |
| Mínima        | -12,22          |
| Máxima        | 14,14           |

Observando a tabela 4.10, se pode dizer que os erros que podem ser cometidos na anomalia de Bouguer quando não é usado um valor de densidade mais real, pode chegar até um valor absoluto de 14 mGal aproximadamente.

Depois de calculadas as anomalias gravimétricas de ar-livre e de Bouguer, para cada estação terrestre se gravaram os registros na Base de Dados Gravimétricos BDG, com as seguintes informações: N<sup>o</sup>, latitude, longitude, altitude, densidade média, gravidade observada, gravidade teórica, anomalia de ar-livre, correção terreno e anomalia de Bouguer.

As informações obtidas em cada estação da BDG terrestres estão apresentadas na tabela 4.11, sendo as altitudes expressas em metros, e as anomalias da gravidade em mGal.

TABELA 4.11. VALORES DA BASE DE DADOS GRAVIMÉTRICOS TERRESTRES

| Estação         | Máximo | Mínimo    | Média     | Variação |
|-----------------|--------|-----------|-----------|----------|
| Latitude        | 3°     | -6        | -1,318°   | 9°       |
| Longitude       | -72°   | -80,5017° | -77,3803° | 8,5017°  |
| Altitude (m)    | 4209,1 | 0         | 754,36    | -        |
| Ar-livre (mGal) | 285,18 | -213,08   | 16,84     | -        |
| Bouguer (mGal)  | 186,04 | -267,19   | -55,04    | -        |

Os dados da anomalia de ar-livre da BDG foram combinados com os dados marinhos de Sandwell. A tabela 4.12 apresenta os valores máximo, mínimo, média, desvio padrão e variação da estação.

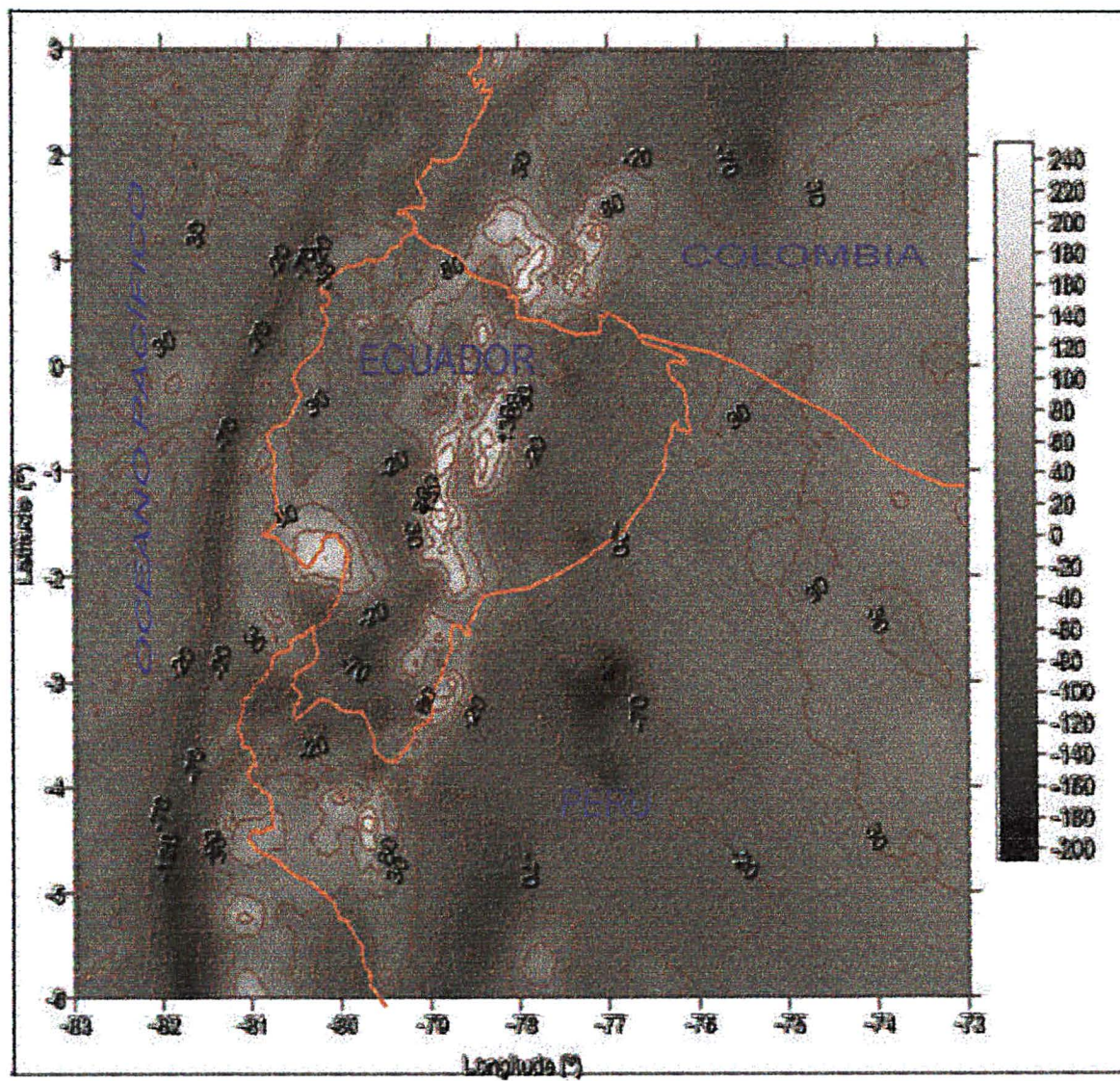
TABELA 4.12. VALORES DO ARQUIVO DE ANOMALIAS DE AR-LIVRE

| Estação         | Máximo | Mínimo  | Média     | Desv. Padrão | Variação |
|-----------------|--------|---------|-----------|--------------|----------|
| Latitude        | 3°     | -6      | -1,318°   | -            | 9°       |
| Longitude       | -73°   | -83°    | -80,6445° | -            | 10°      |
| Ar-livre (mGal) | 285,18 | -213,08 | 3,74      | 48,29        | 498,26   |



A figura 4.17, mostra as anomalias gravimétricas de ar-livre a partir dos valores gravimétricos observados.

FIGURA 4.17. ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS DE AR-LIVRE OBSERVADAS



### 4.3 TREINAMENTO DA REDE NEURAL ARTIFICIAL

Nesta seção, serão mostrados os resultados obtidos na predição da variação lateral de densidades e na geração da malha de anomalia de ar-livre mediante o uso da RNA treinada.

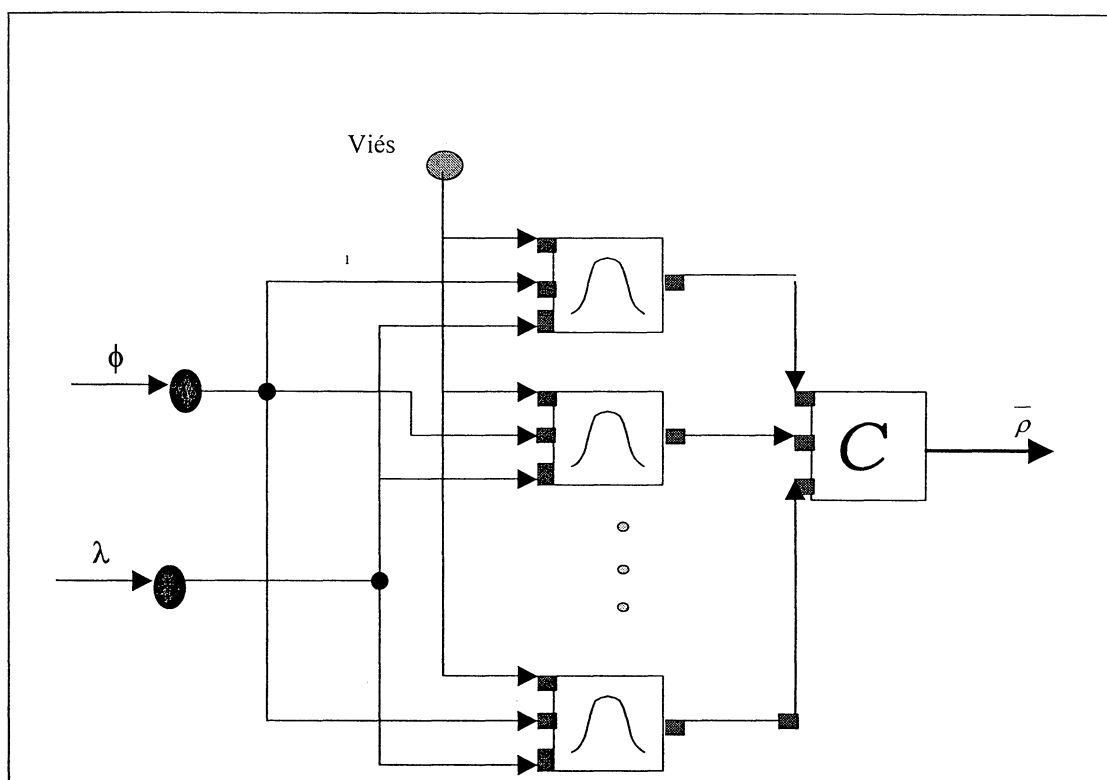
#### 4.3.1 Treinamento da RNA para a Geração do Modelo Digital de Variação Lateral de Densidades

Para poder determinar o valor da densidade média nos pontos gravimétricos observados, e de acordo com os dados disponíveis, descritos na seção 3.4, procedeu-se o treinamento de uma rede neural artificial, com o objetivo de gerar o Modelo Digital de variação de Densidades (MDD).

A rede usada foi uma Rede Neural Probabilística (RNP) que demandou para seu treinamento e posterior uso na predição, um programa usando o toolbox Network Neural Net do MATLAB (ver Anexo I). Esta RNP é um tipo de Rede Neural RBF (seção 2.2.7), e é utilizada principalmente para resolver problemas de classificação.

Esta RNP consiste no seguinte: quando um vetor de entrada é apresentado à rede, na primeira camada é calculada a distância existente entre este vetor de entrada e as entradas dos vetores de treinamento, e produz um vetor cujos elementos indicam que tão perto estão de um elemento de treinamento. A segunda camada soma estas contribuições para cada classe de entradas e produz uma saída como vetor de probabilidades. Finalmente, a função de transferência competitiva na saída da segunda camada escolhe o máximo de estas probabilidades, produzindo um 1 para esta classe e zeros em outros casos. A arquitetura da rede utilizada para a geração do modelo de variação lateral de densidades é mostrada na figura 4.18.

FIGURA 4.18 . REDE NEURAL PROBABILISTICA (RNP)

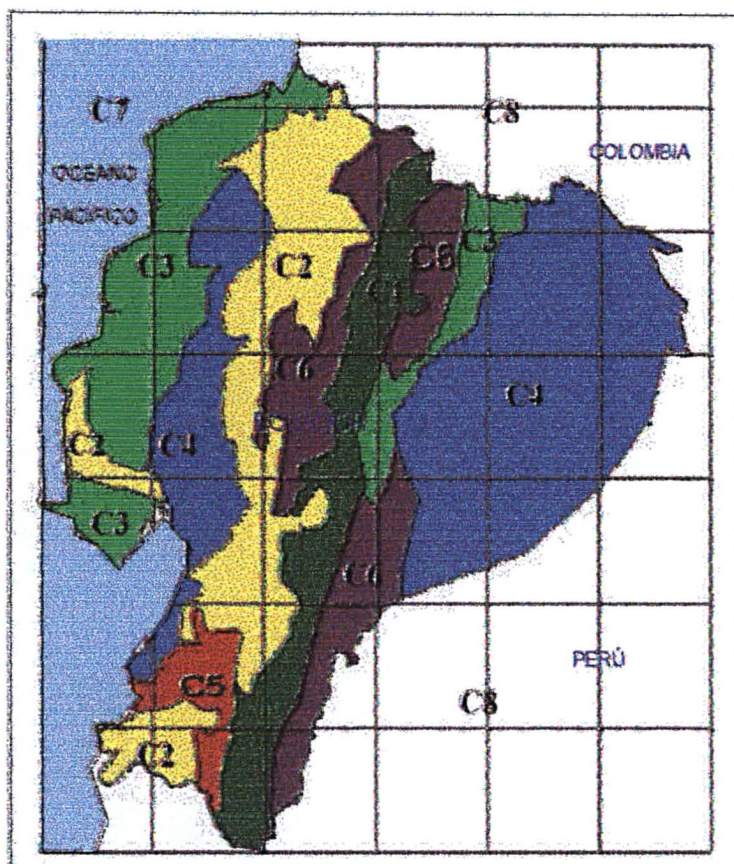


Na figura 4.18 a camada de entrada da RNP, consiste das variáveis latitude e longitude, e a saída é o valor da densidade média. Na camada oculta é usada a função de transferência de base radial, e na camada de saída é usada a função de transferência competitiva. Os dados das densidades que foram usados no processo de treinamento da RNP foram distribuídos em 8 classes definidas de acordo com a seção 3.4, e expressadas de acordo a tabela 4.7.

Com a RNP treinada, procedeu-se à determinação dos valores de densidade média na área de trabalho gerando uma malha de 5 km x 5 km. A figura 4.19, mostra as densidades obtidas com a RNP.



FIGURA 4.19. VARIAÇÃO LATERAL DE DENSIDADE



A RNP treinada foi usada posteriormente para determinar os valores de densidades para os pontos gravimétricos observados. Estas densidades foram utilizadas no cálculo da correção devido ao platô de Bouguer, e a densidade média da parte continental na correção do terreno (seção 4.2.2).

#### 4.3.2 Treinamento e Predição da RNA para Anomalias Gravimétricas de Ar-Livre

No processo de integração utilizando a fórmula de Stokes (seção 2.1.4), as anomalias utilizadas são anomalias de ar-livre reduzidas à superfície geoidal. Então nesta seção é abordada a realização de uma malha gravimétrica de anomalias de ar-livre a partir das observações gravimétricas disponíveis, que na área de estudo são 15187 pontos, e da utilização da RNA treinada. Também, é gerada uma segunda malha de anomalias de Bouguer mediante outra RNA treinada, com o fim de calcular a anomalia de ar-livre a partir da anomalia de Bouguer. As malhas são



geradas com espaçamentos de quadrícula de 5km x 5km, 10km x 10km, 15km x 15km, e 20km x 20km.

Para a geração das malhas de anomalias é utilizada uma Rede Neural Multicamada, descrita na seção 2.2.6, e Rede Neural de Funções de Base Radial, descrita na seção 2.2.7, com programas em MATLAB, conforme o Anexo II (com o programa que foi realizado para a rede Multicamada) e Anexo III (com o programa para uma Rede de Base Radial). Para o treinamento da RNA, a área continental foi dividida em 3 regiões: A primeira compreendida entre os meridianos  $-81^\circ$  e  $-79^\circ$ , (a região do Litoral); a segunda, compreendida entre os meridianos  $-79^\circ$  e  $-78^\circ$  (região Andina); e a terceira compreendida entre os meridianos  $-78^\circ$  e  $-72^\circ$  (ocupada principalmente pela região da bacia amazônica).

#### 4.3.2.1 RNA para a predição de anomalias do ar-livre

A arquitetura geral da RNAM usada consiste de uma camada de entrada, uma só camada oculta, e a camada de saída constituída por um neurônio que gera a anomalia do ar-livre. A função de transferência usada na camada oculta foi a sigmoideal tangente hiperbólica (seção 2.2.3.1), e na camada de saída a função de transferência linear (seção 2.2.3.1). A arquitetura geral da RBF, consiste da camada de entrada, uma só camada oculta com função de transferência gaussiana, e a camada de saída com uma função linear (seção 2.2.7).

Para determinar as arquiteturas finais das RNAs, com o objetivo de ser usada para a determinação da anomalia de ar-livre, foram utilizadas diferentes arquiteturas e com vários testes no processo de treinamento nas três regiões, com as seguintes arquiteturas:

- Na camada de entrada, tanto para a RNAM quanto para a RBF foram aplicadas diferentes variáveis como vetores de entrada na forma:
  - $\phi, \lambda, Hn$
  - $\phi, \lambda, Hn, \gamma$
  - $\phi, Hn, C_{AL}, \gamma$
  - $\phi, \lambda, Hn, C_{AL}$
  - $\phi, \lambda, Hn, C_{AL}, \gamma$

onde :

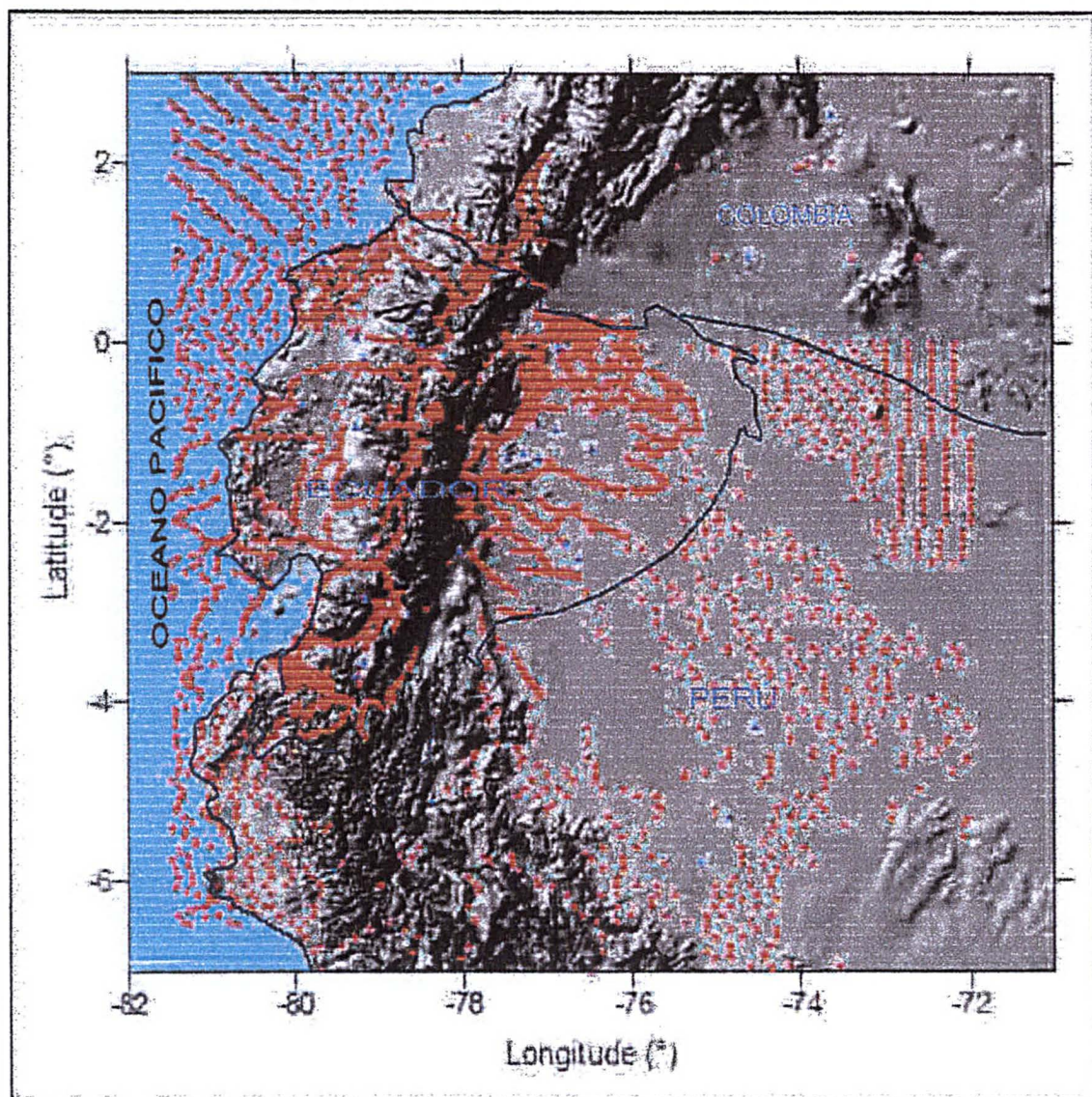
- $\phi$  é a latitude;
- $\lambda$  é a longitude;
- $H_n$  é a altitude nivelada;
- $C_{AL}$  é a correção de ar-livre;
- $\gamma$  é a gravidade normal.

- O número de pontos escolhidos para o processo de treinamento foi realizado em forma aleatória (exceto o número total de pontos) da seguinte forma:
  - O número total (15 187)
  - A metade do número total
  - Uma terça parte do número total
  - Uma quarta parte do número total
- Na camada oculta da RNAM, foi variado o número de neurônios, a partir de 3 até 30 neurônios.

Nos diferentes testes realizados, como anotado anteriormente, para a RNAM o desvio padrão na predição da anomalia de ar-livre atinge até 35 mGal, enquanto para a RBF, o desvio padrão é de no máximo 30 mGal.

Devido aos muitos resultados obtidos, é apresentado na seqüência, de forma mais detalhada a RNAM, a qual forneceu melhor resultado que a RBF: O número de pontos usados para o treinamento foi de 5153 que representa aproximadamente a terça parte do número total de dados gravimétricos disponíveis. Foi escolhida esta quantidade devido a que nos testes efetivados, os resultados obtidos foram praticamente os mesmos. A figura 4.20, mostra estes pontos de treinamento (círculos vermelhos) e os de validação (triângulos azuis).

FIGURA 4.20. PONTOS USADOS NO TREINAMENTO

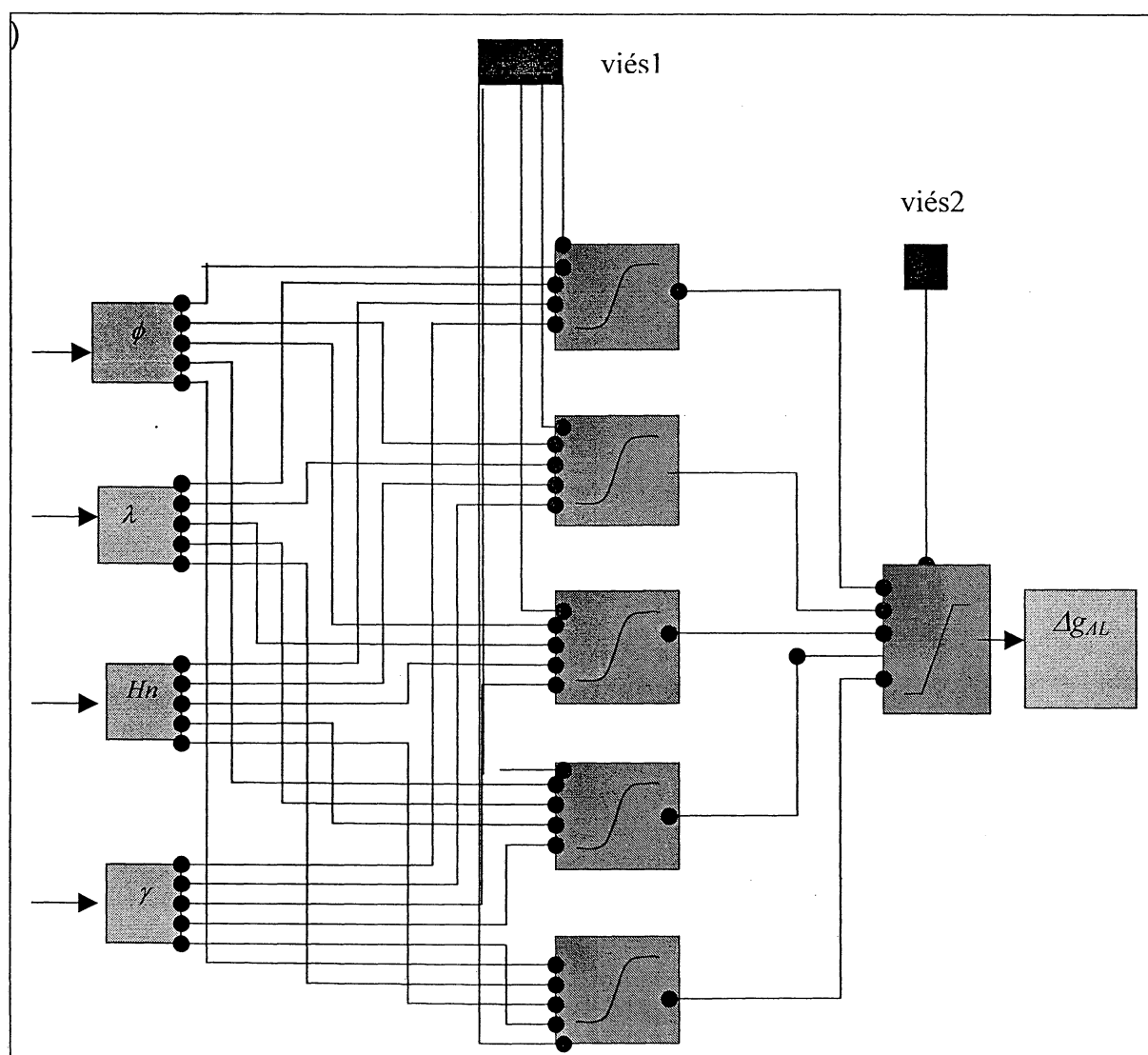


As arquiteturas finais das RNAs foram:

- Para a região do Litoral uma RNA [4 18 1], ou seja, 4 variáveis na camada de entrada ( $\phi, \lambda, Hn, \gamma$ ); 18 neurônios na camada oculta e uma função de transferência tangente hiperbólica (tanh); um neurônio na camada de saída e uma função de transferência linear. A performance alcançada no treinamento com um  $SQE=0,14$ , foi de 0,1397.
- Para a região dos Andes uma RNA [4 5 1] como mostrada na figura 4.21. A estrutura contempla, portanto: 4 variáveis na camada de entrada

- $(\phi, \lambda, Hn, \gamma)$  e com uma função de transferência tangente hiperbólica ( $\tanh$ ); 5 neurônios na camada oculta; um neurônio na camada de saída; com uma função de transferência linear. A performance alcançada no treinamento com um  $SQE=0,05$ , foi de 0,73.
- Para a região da Amazônia uma RNA [4 5 1] - 4 variáveis na camada de entrada  $(\phi, \lambda, Hn, \gamma)$ , uma função de transferência tangente hiperbólica ( $\tanh$ ); 5 neurônios na camada oculta; um neurônio na camada de saída; com uma função de transferência linear. A performance alcançada no treinamento com um  $SQE=0,086$ , foi de 0,091.

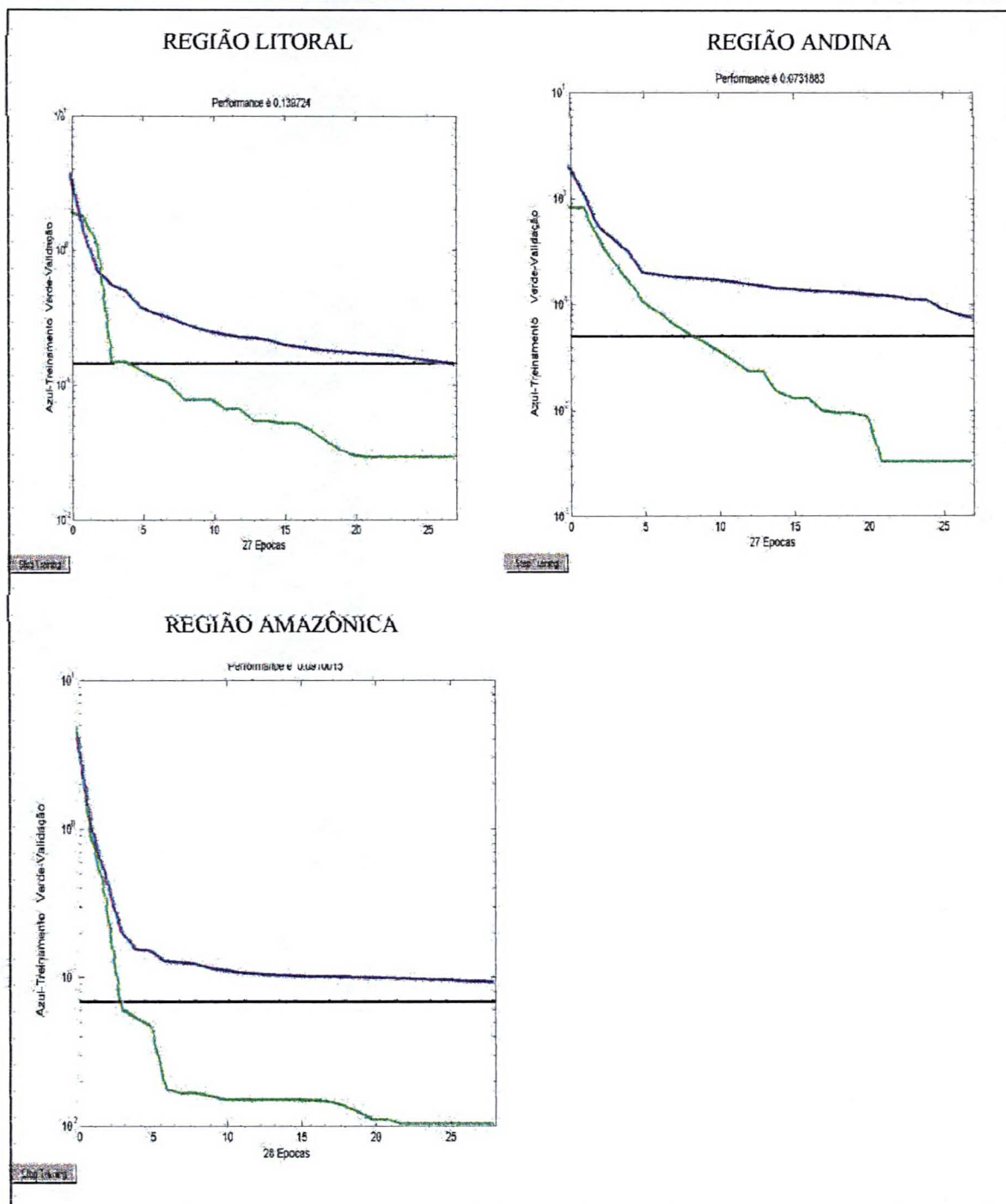
FIGURA 4.21. ARQUITETURA DA RNA [4 5 1] DA REGIÃO DOS ANDES





A figura 4.22, mostra o processo de aprendizagem ou treinamento da RNA das três regiões, e a performance alcançada.

FIGURA 4.22. PERFORMANCE DAS RNAs DAS TRÊS REGIÕES PARA AR-LIVRE



Na figura 4.22, a curva azul (curva de aprendizagem de estimação) indica como o processo de treinamento, ou como a rede vai aprendendo com a informação dada. Isto é feito até seja alcançado a meta ou seu melhor *SQE*. No caso da Região Litoral, foram necessárias 27 iterações (ou épocas) para alcançar a meta desejada. Enquanto para a Região Andina e a Região Amazônica para alcançar a melhor performance foram necessárias 27 e 28 épocas respectivamente. A curva verde (curva de aprendizagem de validação) decresce até um mínimo e então começa a crescer conforme o treinamento continua. Isto leva a um sobre-treinamento (figura 2.8 da seção 2.2.6.1). Esta curva de validação é feita com os pontos de controle (seção 3.5).

As tabelas 4.13, 4.14 e 4.15, mostram os valores das anomalias do ar-livre (coluna 2) nas três regiões respectivamente, obtidas nos pontos de controle (coluna 1) mediante o uso da rede neural treinada, a coluna 3 indica a diferença nos pontos de controle, entre a anomalia de ar-livre obtida com a RNAM e a anomalia do ar-livre observada (tabela 3.2 da seção 3.4).

TABELA 4.13. DIFERENÇA NA REGIÃO DO LITORAL PARA AR-LIVRE

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de ar-livre com RNA (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 3                       | 24,2248                             | 9,19             |
| 7                       | 18,4113                             | 6,90             |
| 10                      | 58,3069                             | -3,94            |
| 11                      | 16,8236                             | 2,29             |
| 13                      | -23,4596                            | 7,99             |
| 19                      | 20,9112                             | 5,12             |
| 20                      | -72,0148                            | -15,65           |
| 24                      | 126,4271                            | 0,47             |
| 26                      | 124,9817                            | 12,67            |
| 31                      | 56,6509                             | 9,65             |
|                         | <b>Média</b>                        | <b>3,47</b>      |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>                | <b>8,31</b>      |

TABELA 4.14. DIFERENÇA NA REGIÃO ANDINA PARA AR-LIVRE

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de ar-livre com RNA (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 5                       | 75,171                              | 3,44             |
| 6                       | 43,9301                             | 3,46             |
| 8                       | 100,5186                            | -1,94            |
| 22                      | -7,2918                             | -0,92            |
| 25                      | 107,5094                            | 6,01             |
| 28                      | -121,6232                           | 8,38             |
|                         | <b>Média</b>                        | <b>3,07</b>      |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>                | <b>3,95</b>      |

TABELA 4.15. DIFERENÇA NA REGIÃO AMAZÔNICA PARA AR-LIVRE

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de ar-livre com RNA (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 1                       | 43,8732                             | 7,87             |
| 2                       | 36,5558                             | -0,44            |
| 4                       | 127,964                             | -7,66            |
| 9                       | -27,6528                            | -6,01            |
| 12                      | -29,7409                            | -1,07            |
| 14                      | -13,4343                            | -2,42            |
| 15                      | -3,8458                             | 8,96             |
| 16                      | -46,0618                            | 6,72             |
| 17                      | -50,361                             | 9,85             |
| 18                      | -39,0475                            | -5,38            |
| 21                      | -21,0615                            | 2,53             |
| 23                      | -12,5823                            | 5,62             |
| 27                      | 17,0626                             | 4,06             |
| 29                      | -8,0629                             | -0,06            |
| 30                      | -21,0864                            | 2,91             |
|                         | <b>Média</b>                        | <b>1,70</b>      |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>                | <b>5,57</b>      |

O resumo dos resultados das diferenças das anomalias de ar-livre obtidas com a RNAM no total dos pontos de controle é mostrado na tabela 4.16, mediante os valores da média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo.

TABELA 4.16. DIFERENÇAS NA ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDAS COM AS RNAM NA REGIÃO TOTAL

|               | DIFERENÇAS (mGal) |
|---------------|-------------------|
| Média         | 2,54              |
| Desvio padrão | 6,21              |
| Mínimo        | -15,65            |
| Máximo        | 12,67             |

Observando a tabela 4.16, pode-se dizer que o valor médio das anomalias de ar-livre calculadas com a RNAM na região de estudo é 2,54 mGal, e sua precisão 6,21 mGal.

#### 4.3.2.2 RNA para determinação da anomalia de Bouguer

Para determinar as arquiteturas finais das RNAs, com o objetivo de ser usada para a determinação da anomalia de Bouguer, foram utilizados diferentes arquiteturas e vários testes no processo de treinamento nas três regiões, nas seguintes formas:

Na camada de entrada, tanto para a RNAM quanto para a RBF foram usadas diferentes variáveis como vetores de entrada;

- $\phi, \lambda, Hn, \bar{\rho}$
- $\phi, Hn, \bar{\rho}$
- $\phi, Hn, \bar{\rho}, C_T, C_B$
- $\phi, \lambda, Hn, C_T, C_B$
- $\phi, \lambda, Hn, \bar{\rho}, C_T$
- $\phi, \lambda, Hn, \bar{\rho}, C_T, C_B$
- $\phi, \lambda, Hn, \bar{\rho}, \gamma$
- $\phi, \lambda, Hn, C_{AL}, \gamma, C_T, C_B$



onde:

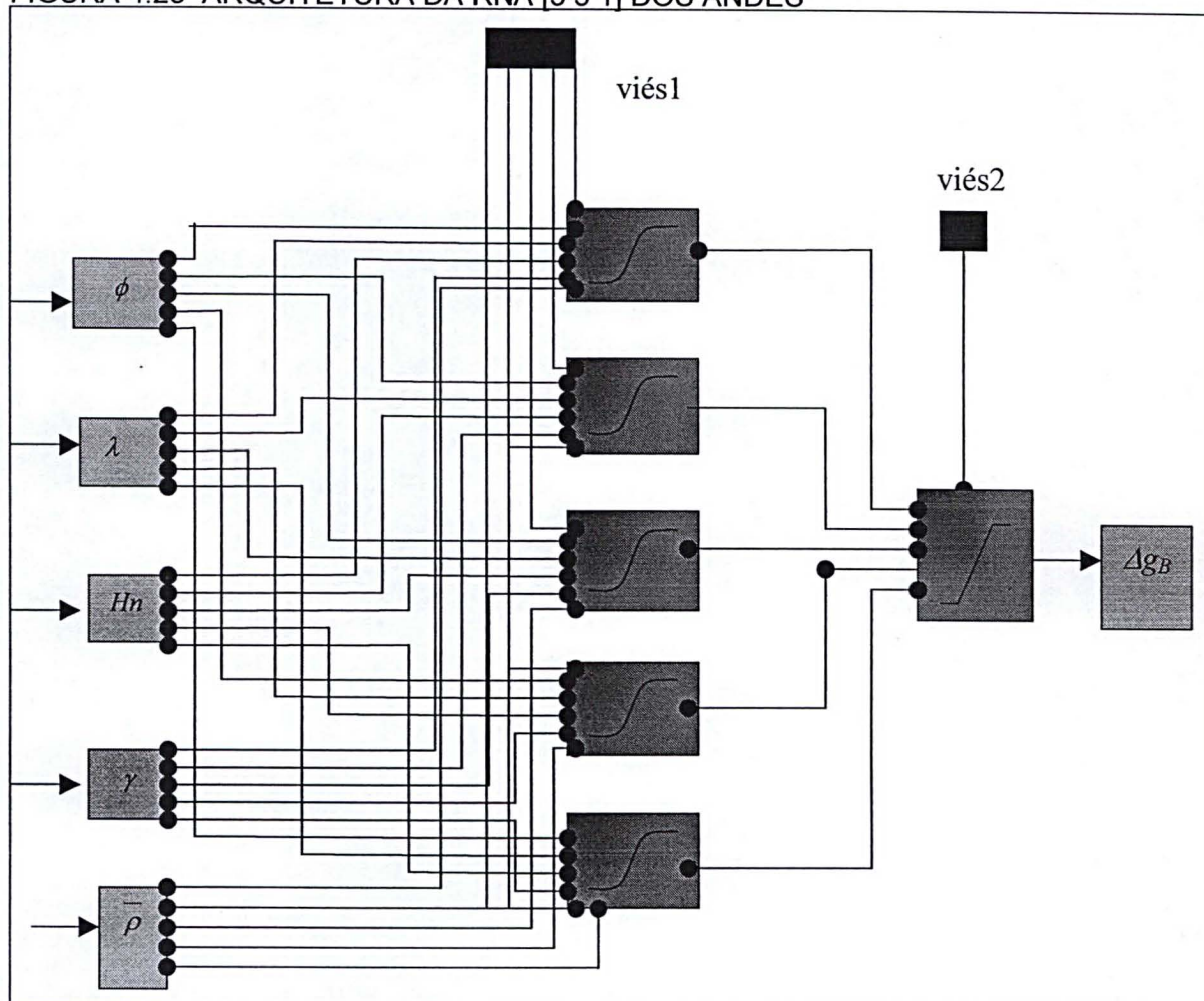
- $\bar{\rho}$  é a densidade média;
- $C_B$  é a correção de Bouguer;
- $C_T$  é a correção do terreno.

De igual forma que no testes anteriores realizados na seção 4.3.2.1, foi realizado o treinamento de uma RNAM e uma RBF utilizando diferente quantidade de pontos e variando o número de neurônios na camada oculta. As RNAs que deram melhores resultados foram as redes multicamadas, com os mesmos 5153 pontos de treinamento, as suas arquiteturas são detalhadas na sequência.

Estas arquiteturas finais das RNAs multicamadas foram:

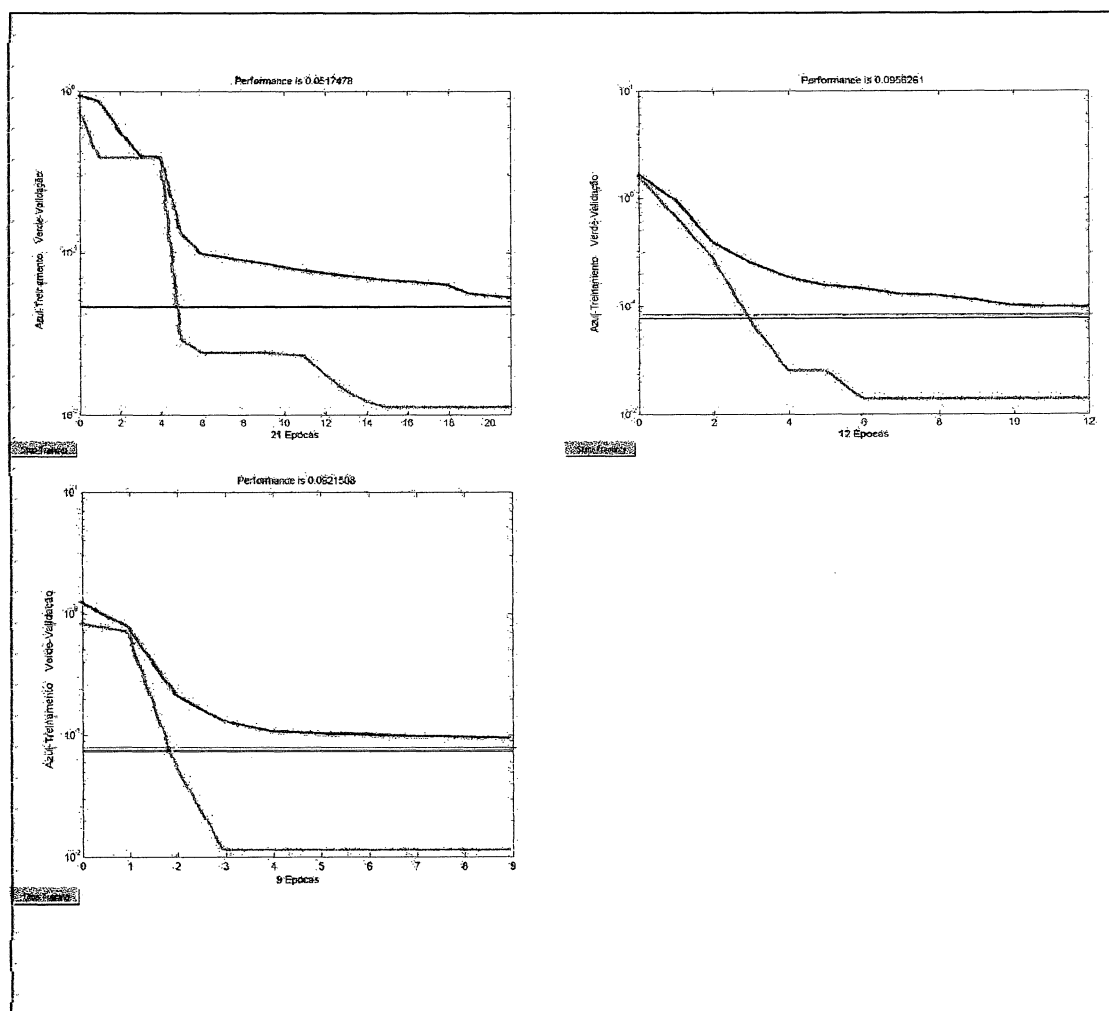
- Para a região do Litoral uma RNA [5 15 1] - 5 variáveis na camada de entrada  $(\phi, \lambda, Hn, \bar{\rho}, \gamma)$ ; 15 neurônios na camada oculta e com uma função de transferência tangente hiperbólica (tanh); um neurônio na camada de saída; uma função de transferência linear. A performance alcançada no treinamento com um  $SQE=0.046$ , foi de 0.0517 este valor apresenta um grau satisfatório, e por tanto o processo de treinamento pode ser finalizado.
- Para a região dos Andes uma RNA [5 5 1] como mostrada na figura 4.23 - 5 variáveis na camada de entrada  $(\phi, \lambda, Hn, \bar{\rho}, \gamma)$ ; 5 neurônios na camada oculta e com uma função de transferência tangente hiperbólica (tanh); um neurônio na camada de saída; uma função de transferência linear. A performance alcançada no treinamento com um  $SQE= 0.075$ , foi de 0.092.
- Para a região da Amazônia uma RNA [5 6 1] - 5 variáveis na camada de entrada  $(\phi, \lambda, Hn, \bar{\rho}, \gamma)$ ; 6 neurônios na camada oculta e com uma função de transferência tangente hiperbólica (tanh); um neurônio na camada de saída; uma função de transferência linear. A performance alcançada no treinamento com um  $SQE= 0.075$ , foi de 0.096.

FIGURA 4.23 ARQUITETURA DA RNA [5 5 1] DOS ANDES



A figura 4.24, mostra o processo de aprendizagem ou treinamento da RNA das três regiões, e a performance alcançada.

FIGURA 4.24. PERFORMANCE DAS RNAMs DAS TRÊS REGIÕES PARA BOUGUER



As tabelas 4.17, 4.18 e 4.19, mostram os valores das anomalias de Bouguer (coluna 2) nas três regiões, obtidas nos pontos de controle (coluna 1) mediante o uso da rede neural treinada. A coluna 3 indica a diferença nos pontos de controle, entre a anomalia de Bouguer obtida com a RNAM e a anomalia de Bouguer observada.

TABELA 4.17. DIFERENÇA NA REGIÃO DO LITORAL PARA BOUGUER

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de Bouguer com RNA (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|------------------------------------|------------------|
| 3                       | 18,9129                            | 2,01             |
| 7                       | -0,5347                            | -0,37            |
| 10                      | 7,7553                             | -15,75           |
| 11                      | 24,7846                            | -4,98            |
| 13                      | -7,2948                            | 1,41             |
| 19                      | 16,5297                            | -1,42            |
| 20                      | -57,2647                           | 1,01             |
| 24                      | -174,475                           | 11,46            |
| 26                      | -160,749                           | -1,94            |
| 31                      | -86,2141                           | 0,40             |
|                         | <b>Média</b>                       | <b>-0,82</b>     |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>               | <b>6,75</b>      |

TABELA 4.18. DIFERENÇA NA REGIÃO ANDINA PARA BOUGUER

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de Bouguer com RNA (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|------------------------------------|------------------|
| 5                       | -136,0603                          | -2,80            |
| 6                       | -91,6593                           | -4,43            |
| 8                       | -184,9376                          | -11,93           |
| 22                      | -112,6418                          | -10,94           |
| 25                      | -186,9475                          | -12,42           |
| 28                      | -157,1535                          | -6,38            |
|                         | <b>Média</b>                       | <b>-8,15</b>     |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>               | <b>4,14</b>      |

TABELA 4.19. DIFERENÇA NA REGIÃO AMAZÔNICA PARA BOUGUER

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de Bouguer com RNA (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|------------------------------------|------------------|
| 1                       | 11,21                              | -3,74            |
| 2                       | 16,35                              | 3,75             |
| 4                       | -143,33                            | 3,48             |
| 9                       | -51,34                             | 0,34             |
| 12                      | -61,21                             | -0,20            |
| 14                      | -49,91                             | -9,52            |
| 15                      | -27,17                             | 2,15             |
| 16                      | -69,06                             | 13,72            |
| 17                      | -76,90                             | 11,70            |
| 18                      | -58,82                             | -0,27            |
| 21                      | -46,19                             | 2,80             |
| 23                      | -39,66                             | 3,05             |
| 27                      | 10,04                              | 3,37             |
| 29                      | -8,36                              | 3,14             |
| 30                      | -20,87                             | 6,28             |
|                         | <b>Média</b>                       | <b>2,67</b>      |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>               | <b>5,55</b>      |

O resumo, dos resultados das diferenças das anomalias de Bouguer obtidas com a RNAM no total dos pontos de controle é mostrado na tabela 4.20, mediante os valores da média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo.

TABELA 4.20. DIFERENÇAS NA ANOMALIA DE BOUGUER OBTIDAS COM AS RNAM NA REGIÃO TOTAL

|               | DIFERENÇAS (mGal) |
|---------------|-------------------|
| Média         | -0,55             |
| Desvio padrão | 6,91              |
| Mínima        | -15,75            |
| Máxima        | 13,72             |

#### 4.3.2.2.1 Cálculo da anomalia de ar-livre a partir da anomalia de Bouguer

Com a determinação, nos pontos de controle, da anomalia de Bouguer por meio da RNAM, procedeu-se ao cálculo das correspondentes anomalias do Ar-Livre com a equação (4.1).

As tabelas 4.21, 4.22 e 4.23, mostram os valores das anomalias do Ar-Livre (coluna 2) nas três regiões, obtidas nos pontos de controle (coluna 1) a partir das anomalias de Bouguer. A coluna 3 indica a diferença nos pontos de controle, entre a anomalia do Ar-Livre obtida a partir de Bouguer e a anomalia de Ar-Livre observada (tabela 3.2 da seção 3.4).

TABELA 4.21. DIFERENÇA NA REGIÃO DO LITORAL

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de ar-livre a partir de Bouguer (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|---|------------------|
| 3                       | 17,041  | 2,01             |
| 7                       | 11,148  | -0,36            |
| 10                      | 46,503  | -15,75           |
| 11                      | 9,543   | -4,99            |
| 13                      | -30,045   | 1,40             |
| 19                      | 14,377  | -1,41            |
| 20                      | -55,353   | 1,01             |
| 24                      | 137,424   | 11,46            |
| 26                      | 110,364   | -1,95            |
| 31                      | 47,404  | 0,40             |
|                         | <b>Média</b>                                    | <b>-0,82</b>     |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>                            | <b>6,76</b>      |

TABELA 4.22. DIFERENÇA NA REGIÃO ANDINA

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de ar-livre a partir de Bouguer (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|---|------------------|
| 5                       | 68,934  | -2,80            |
| 6                       | 36,046  | -4,42            |
| 8                       | 90,527  | -11,93           |
| 22                      | -17,315   | -10,94           |
| 25                      | 89,082  | -12,42           |
| 28                      | -136,379  | -6,38            |
|                         | <b>Média</b>                                    | <b>-8,15</b>     |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>                            | <b>4,15</b>      |

TABELA 4.23. DIFERENÇA NA REGIÃO AMAZÔNICA

| Nº do Ponto de Controle | Anomalia de ar-livre a partir de Bouguer<br>(mGal) | Diferença<br>(mGal) |
|-------------------------|--|---------------------|
| 1                       | 32,261   | -3,74               |
| 2                       | 40,749   | 3,75                |
| 4                       | 139,106  | 3,48                |
| 9                       | -21,304  | 0,34                |
| 12                      | -28,875  | -0,21               |
| 14                      | -20,533  | -9,52               |
| 15                      | -10,656  | 2,15                |
| 16                      | -39,061  | 13,72               |
| 17                      | -48,516  | 11,70               |
| 18                      | -33,933  | -0,26               |
| 21                      | -20,795  | 2,80                |
| 23                      | -15,150  | 3,06                |
| 27                      | 16,376   | 3,38                |
| 29                      | -4,861   | 3,14                |
| 30                      | -17,726  | 6,27                |
|                         | <b>Média</b>                                       | <b>2,67</b>         |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>                               | <b>5,55</b>         |

O resumo dos resultados das diferenças das anomalias do Ar-Livre obtidas a partir de Bouguer no total dos pontos de controle é mostrado na tabela 4.24, mediante a média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo.

TABELA 4.24. DIFERENÇAS NA ANOMALIA DE AR-LIVRE OBTIDAS A PARTIR DE BOUGUER NA REGIÃO TOTAL

|               | DIFERENÇAS (mGal) |
|---------------|-------------------|
| Média         | -0,55             |
| Desvio padrão | 6,91              |
| Mínima        | -15,75            |
| Máxima        | 13,72             |

#### 4.3.3 Cálculo Anomalia Ar-Livre mediante interpolação por Kriging

A palavra “kriging” é sinônima de “interpolador ótimo”, fazendo inferências sobre valores não observados. Kriging é um método geoestatístico que usa técnicas estatísticas para a análise dos dados, e critérios estatísticos para as interpolações (não tendencioso, mínima variância), (CRESSIE, 1993), (KITANIDIS, 1999), (TIERRA & DE FREITAS, 2002).

Este método é muito utilizado em diferentes campos, e em forma particular na interpolação de anomalias gravimétricas. Dá bons resultados especialmente em regiões com boa distribuição de observações gravimétricas. Este método é utilizado na seqüência para interpolar anomalias do Ar-Livre nos mesmos pontos de controle que os anteriores. Estes valores de anomalia da gravidade são então comparados com os valores obtidos com as RNAMs.

Para interpolar as anomalias de Ar-Livre nos pontos de controle, foi usado neste caso o programa SURFER, realizando malhas de anomalias do Ar-livre com espaçamento de: 5km x 5km, 10km x 10km, 15km x 15km, e 20km x 20km.

A tabela 4.25 mostra os resultados das anomalias de Ar-Livre obtidas por interpolação, assim como as diferenças entre as calculadas mediante a interpolação e as observadas (tabela 3.2 da seção 3.4). Na mesma tabela são mostrados os valores da média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo.



TABELA 4.25. DIFERENÇAS DAS ANOMALIAS DE AR-LIVRE OBTIDAS COM O MÉTODO DE KRIGING

| Nº do Ponto de Controle | A. Ar-livre a partir de Kriging de 5km (mGal) | Diferença (mGal) | A. Ar-livre a partir de Kriging de 10km (mGal) | Diferença (mGal) | A. Ar-livre a partir de Kriging de 15km (mGal) | Diferença (mGal) | A. Ar-livre a partir de Kriging de 20km (mGal) | Diferença (mGal) |
|-------------------------|---|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|
| 1                       | 30,227  | -5,773           | 30,343   | -5,657           | 30,196   | -5,804           | 30,189   | -5,811           |
| 2                       | 30,481  | -6,519           | 30,107   | -6,893           | 30,547   | -6,453           | 29,995   | -7,005           |
| 3                       | 27,562  | 12,532           | 28,082   | 13,052           | 29,707   | 14,677           | 29,626   | 14,596           |
| 4                       | 113,617                                       | -22,009          | 112,069  | -23,557          | 106,608  | -29,018          | 110,549  | -25,077          |
| 5                       | 84,083  | 12,353           | 85,601   | 13,871           | 81,358   | 9,628            | 84,883   | 13,153           |
| 6                       | 63,349  | 22,879           | 63,914   | 23,444           | 65,759   | 25,289           | 68,774   | 28,304           |
| 7                       | 40,515  | 29,005           | 40,066   | 28,556           | 39,570   | 28,060           | 39,807   | 28,297           |
| 8                       | 118,893                                       | 16,433           | 119,214  | 16,754           | 114,317  | 11,857           | 111,483  | 9,023            |
| 9                       | -18,254                                       | 3,389            | -19,022  | 2,621            | -18,703  | 2,940            | -20,316  | 1,327            |
| 10                      | 69,664  | 7,414            | 68,709   | 6,459            | 63,399   | 1,149            | 67,918   | 5,668            |
| 11                      | 19,056  | 4,526            | 19,368   | 4,838            | 18,641   | 4,111            | 18,210   | 3,680            |
| 12                      | -33,024                                       | -4,357           | -33,222  | -4,555           | -33,469  | -4,802           | -33,537  | -4,870           |
| 13                      | -14,742                                       | 16,708           | -16,670  | 14,780           | -12,672  | 18,778           | -6,699   | 24,751           |
| 14                      | -26,227                                       | -15,212          | -26,005  | -14,990          | -26,363  | -15,348          | -26,195  | -15,180          |
| 15                      | -4,104  | 8,705            | -4,084   | 8,725            | -3,270   | 9,539            | -4,547   | 8,262            |
| 16                      | -38,831                                       | 13,952           | -38,992  | 13,791           | -39,603  | 13,180           | -38,756  | 14,027           |
| 17                      | -47,847                                       | 12,369           | -48,597  | 11,619           | -48,310  | 11,906           | -47,034  | 13,182           |
| 18                      | -33,774                                       | -0,102           | -33,947  | -0,275           | -34,247  | -0,575           | -33,684  | -0,012           |
| 19                      | 18,700  | 2,910            | 19,118   | 3,328            | 19,478   | 3,688            | 21,047   | 5,257            |
| 20                      | -39,667                                       | 16,693           | -39,425  | 16,935           | -37,330  | 19,030           | -40,888  | 15,472           |
| 21                      | -22,254                                       | 1,342            | -22,207  | 1,389            | -22,516  | 1,080            | -22,261  | 1,335            |
| 22                      | -10,328                                       | -3,952           | -10,364  | -3,988           | -13,806  | -7,430           | -15,543  | -9,167           |
| 23                      | -9,019  | 9,187            | -9,342   | 8,864            | -9,081   | 9,125            | -9,043   | 9,163            |
| 24                      | 122,075                                       | -3,885           | 120,880  | -5,080           | 105,962  | -19,998          | 119,353  | -6,607           |
| 25                      | 110,280                                       | 8,780            | 103,667  | 2,167            | 89,895   | -11,605          | 95,470   | -6,030           |
| 26                      | 47,425  | -64,885          | 45,720   | -66,590          | 42,222   | -70,088          | 29,853   | -82,457          |
| 27                      | 13,939  | 0,939            | 14,048   | 1,048            | 14,044   | 1,044            | 13,929   | 0,929            |
| 28                      | -108,160                                      | 21,840           | -107,725                                       | 22,275           | -108,160                                       | 21,840           | -106,991                                       | 23,009           |
| 29                      | -11,670                                       | -3,670           | -11,598  | -3,598           | -11,587  | -3,587           | -11,498  | -3,498           |
| 30                      | -16,339                                       | 7,661            | -16,121  | 7,879            | -16,128  | 7,872            | -15,870  | 8,130            |
| 31                      | 15,006  | -31,994          | 13,052   | -33,948          | 12,741   | -34,259          | 13,344   | -33,656          |
|                         |   |                  |  |                  |  |                  |  |                  |
|                         | <b>Média</b>                                  | <b>2,170</b>     |  | <b>1,718</b>     |  | <b>0,188</b>     |  | <b>0,909</b>     |
|                         | <b>Desvio Padrão</b>                          | <b>17,948</b>    |  | <b>18,324</b>    |  | <b>19,601</b>    |  | <b>20,949</b>    |
|                         | <b>Mínima</b>                                 | <b>-64,885</b>   |  | <b>-66,590</b>   |  | <b>-70,088</b>   |  | <b>-82,457</b>   |
|                         | <b>Máxima</b>                                 | <b>29,005</b>    |  | <b>28,556</b>    |  | <b>28,060</b>    |  | <b>28,304</b>    |

A tabela 4.26 apresenta o resumo referente aos resultados das diferenças das anomalias de Ar-Livre obtidas com: a RNAM (seção 4.3.2.1); a partir de Bouguer (seção 4.3.2.2); e pelo método de Kriging (seção 4.3.3).

TABELA 4.26. RESULTADOS DAS ANOMALIAS DE AR-LIVRE (mGal)

| PROCESSO        |      | Média | Desvio Padrão | Valor Mínimo | Valor Máximo |
|-----------------|------|-------|---------------|--------------|--------------|
| ALIVRE-RNAM     |      | 2,54  | 6,21          | -15,65       | 12,67        |
| ALIVRE-BOU-RNAM |      | -0,55 | 6,91          | -15,75       | 13,72        |
| KRIGING         | 5km  | 2,17  | 17,85         | -64,88       | 29,00        |
|                 | 10km | 1,72  | 18,32         | -66,59       | 28,56        |
|                 | 15km | 0,19  | 19,60         | -70,09       | 28,06        |
|                 | 20km | 0,81  | 20,95         | -82,46       | 28,30        |

Observando a tabela 4.26, pode-se dizer que o uso das RNAs na predição de anomalias do ar-livre e de anomalias de Bouguer para o posterior cálculo das anomalias do ar-livre, dão resultados sensivelmente melhores que o método clássico de Kriging.

Tanto para as anomalias de ar-livre quanto para as obtidas a partir das anomalias de Bouguer, foram estabelecidas malhas com espaçamentos de 5km x 5km, 10km x 10km, 15km x 15km, e 20km x 20km mediante o uso das RNAs treinadas (seções 4.3.2.1 e 4.3.2.2).

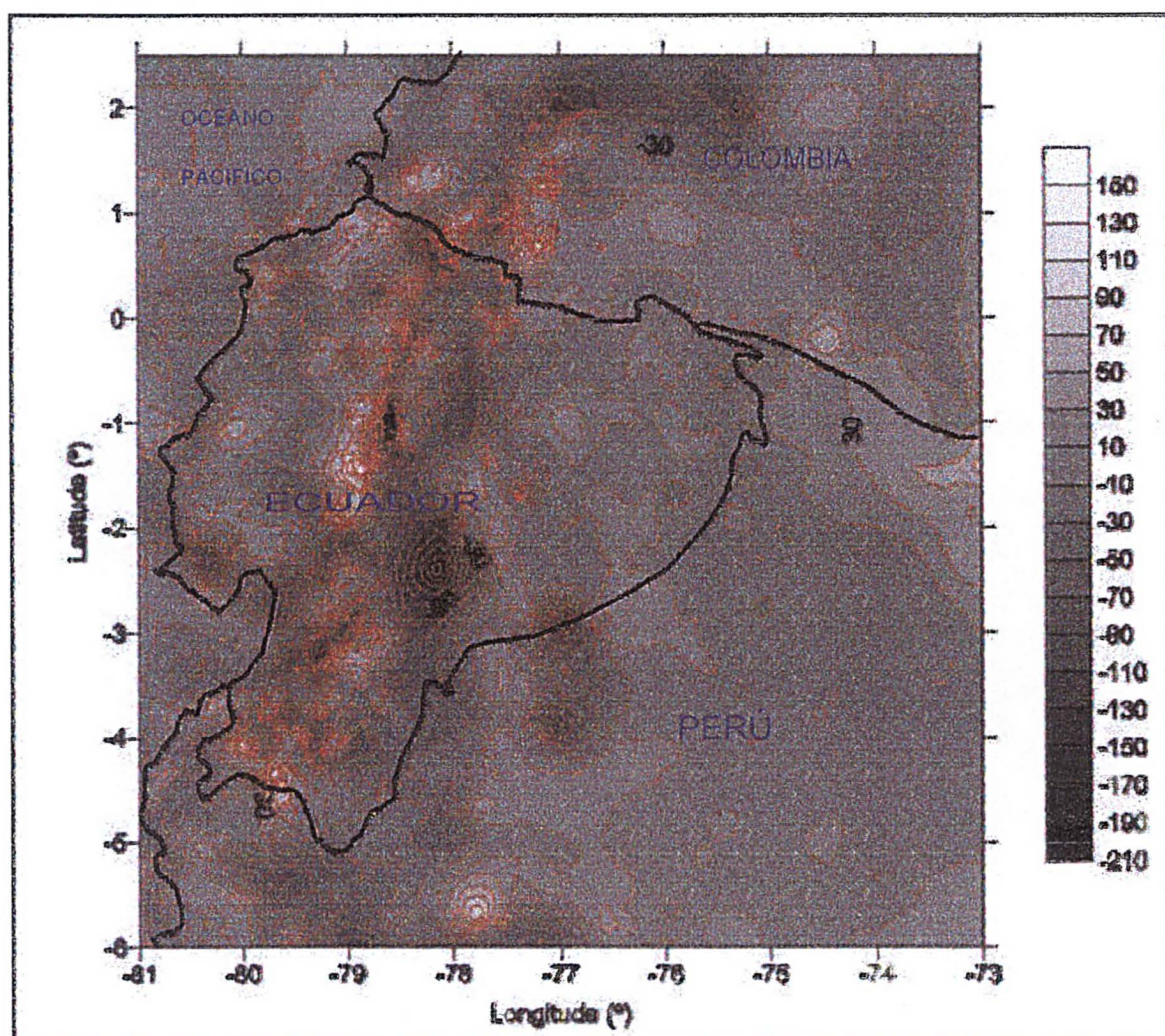
#### 4.4 CÁLCULO DOS MODELOS GEOIDAIS

Foi visto anteriormente que a ondulação geoidal  $N$  pode ser descomposta de acordo com a equação (2.52, seção 2.1.6). Nas seções seguintes é tratada a determinação da altura geoidal residual, e com a adição das demais componentes da equação (2.52), é tratada a determinação da ondulação geoidal resultante.

#### 4.4.1 CÁLCULO DAS ANOMALIAS RESIDUAIS

A partir dos valores observados de gravidade nas estações, das respectivas coordenadas, e de acordo com a equação (2.47), foram calculadas as anomalias gravimétricas residuais. A figura 4.25, mostra as anomalias residuais obtidas na região de estudo.

FIGURA 4.25. ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS RESIDUAIS (INTERVALO DE CONTORNO: 20 mGal)



Os valores das anomalias residuais nos pontos gravimétricos observados na região de estudo são mostrados na tabela 4.27.

TABELA 4.27. RESULTADOS DAS ANOMALIAS RESIDUAIS

|               | ANOMALIA RESIDUAL (mGal) |
|---------------|--------------------------|
| Média         | -1,76                    |
| Desvio padrão | 39,78                    |
| Mínima        | -212,15                  |
| Máxima        | 225,32                   |

A partir das malhas de anomalias do ar-livre, da correção do terreno, do efeito indireto na anomalia, das anomalias geradas pelo modelo EGM96 com grau e ordem de 360, e de acordo a equação (2.47), foram determinadas as anomalias residuais para todas as malhas. As tabelas 4.28 e 4.29, mostram o resumo dos valores obtidos nas anomalias gravimétricas residuais nas malhas, para os dois processos respectivamente .

TABELA 4.28. ANOMALIAS RESIDUAIS COM O PROCESSO ALIVRE-RNAM

|                     | ESPAÇAMENTO DA MALHA |         |         |         |
|---------------------|----------------------|---------|---------|---------|
|                     | 5km                  | 10km    | 15km    | 20km    |
| Média (mGal)        | 0,85                 | 0,82    | 0,80    | 1,19    |
| Desvio padrão(mGal) | 38,52                | 38,80   | 38,84   | 38,97   |
| Mínima (mGal)       | -253,79              | -241,84 | -222,60 | -197,09 |
| Máxima (mGal)       | 264,66               | 226,98  | 213,39  | 191,51  |

TABELA 4.29. ANOMALIAS RESIDUAIS COM O PROCESSO ALIVRE BOU-RNAM

|                     | ESPAÇAMENTO DA MALHA |         |         |         |
|---------------------|----------------------|---------|---------|---------|
|                     | 5km                  | 10km    | 15km    | 20km    |
| Média (mGal)        | 3,71                 | 3,52    | 3,04    | 2,98    |
| Desvio padrão(mGal) | 49,66                | 50,23   | 50,76   | 51,22   |
| Mínima (mGal)       | -317,19              | -316,67 | -316,67 | -309,22 |
| Máxima (mGal)       | 377,31               | 342,45  | 320,06  | 285,46  |

#### 4.4.2 CÁLCULO DAS ONDULAÇÕES RESIDUAIS

As anomalias residuais adicionadas às correções de relevo para as diferentes malhas possibilitaram a integração discreta da fórmula de Stokes (equação 2.50) utilizando o *kernel* da função em forma rigorosa (equação 2.28).

A ondulação residual foi calculada nas estações de controle que foram obtidas por GPS/ Nivelamento (seção 3.5). Os resultados das ondulações residuais obtidos mediante a utilização das respectivas malhas de anomalias residuais de acordo ao processo ALIVRE -RNAME estão resumidos na tabela 4.30.

TABELA 4.30. ONDULAÇÕES RESIDUAIS NOS PONTOS DE CONTROLE COM O PROCESSO ALIVRE-RNAME.

|                   | ESPAÇAMENTO DA MALHA |       |       |       |
|-------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|                   | 5km                  | 10km  | 15km  | 20km  |
| Média (m)         | 0,14                 | 0,19  | 0,19  | 0,33  |
| Desvio padrão (m) | 1,03                 | 1,08  | 1,04  | 1,22  |
| Mínima (m)        | -2,79                | -2,79 | -2,74 | -2,90 |
| Máxima (m)        | 1,28                 | 2,05  | 1,53  | 2,42  |

Os resultados das ondulações residuais obtidos mediante a utilização das respectivas malhas de anomalias residuais de acordo ao processo ALIVRE-BOU-RNAME, estão resumidos na tabela 4.31.

TABELA 4.31. ONDULAÇÕES RESIDUAIS NOS PONTOS DE CONTROLE COM PROCESSO ALIVRE-BOU-RNAME

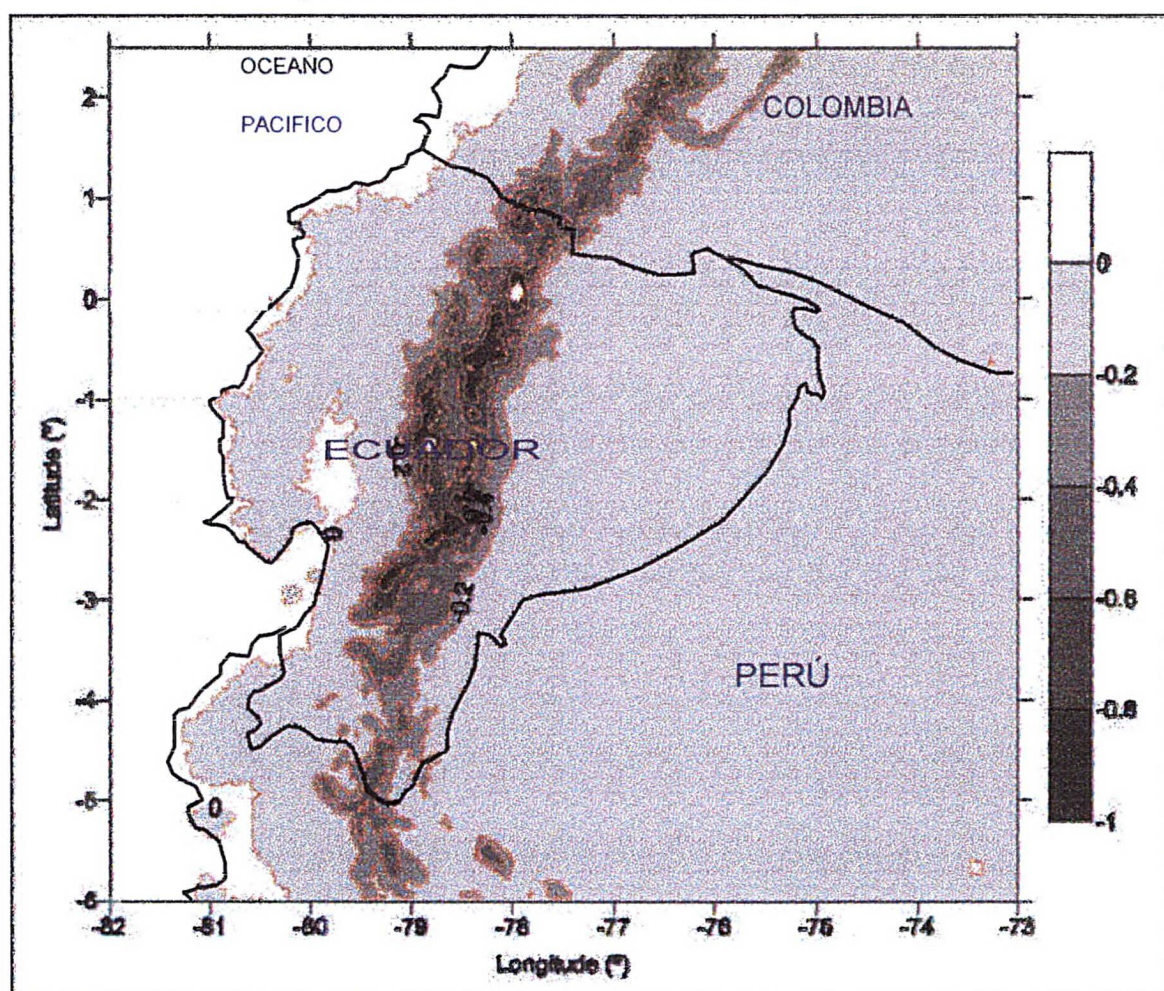
|                   | ESPAÇAMENTO DA MALHA |       |       |       |
|-------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|                   | 5km                  | 10km  | 15km  | 20km  |
| Média (m)         | 0,50                 | 0,54  | 0,54  | 0,46  |
| Desvio padrão (m) | 1,64                 | 1,75  | 1,85  | 2,08  |
| Mínima (m)        | -3,58                | -3,87 | -4,31 | -5,62 |
| Máxima (m)        | 3,24                 | 3,50  | 2,88  | 3,98  |



#### 4.4.3 ONDULAÇÕES GEOIDAIS RESULTANTES

A figura 4.26 mostra a malha do efeito indireto devido à condensação de Helmert calculada com o programa *Ind* (SIDERIS, apud Escola do Geóide, IAG/IBGE, 1997), expressando os valores em metros. O intervalo de espaçamento dos pontos da malha foi de 5km x 5km.

FIGURA 4.26. EFEITO INDIRETO DO METODO DE CONDENSAÇÃO DE HELMERT  
(INTERVALO DE CONTORNO: 0.2 m)





Os resultados das ondulações geoidais resultantes para as diferentes malhas para o processo ALIVRE-RNAM estão resumidos na tabela 4.32.

TABELA 4.32. RESULTADOS DA ONDULAÇÃO GEOIDAL DO PROCESSO ALIVRE-RNAM

| Nº do Ponto de Controle | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) | <i>N</i> 5km (m) | <i>N</i> 10KM (m) | <i>N</i> 15KM (m) | <i>N</i> 20KM (m) |
|-------------------------|--------------|---------------|--------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1                       | -2,32959     | -80,89473     | 55,187       | 11,118           | 11,038            | 11,06             | 10,963            |
| 2                       | -0,03657     | -78,48016     | 3514,720     | 26,186           | 26,201            | 26,314            | 26,847            |
| 3                       | 0,00021      | -78,42843     | 2636,034     | 26,119           | 26,148            | 26,282            | 26,891            |
| 4                       | -0,24447     | -78,54098     | 2924,024     | 27,033           | 27,24             | 27,146            | 27,415            |
| 5                       | -0,21515     | -78,49360     | 2892,724     | 26,88            | 27,072            | 26,935            | 27,435            |
| 6                       | -0,26280     | -78,41945     | 3188,916     | 27,008           | 27,281            | 27,018            | 27,52             |
| 7                       | -0,81395     | -78,62650     | 2913,570     | 28,203           | 28,236            | 28,538            | 28,918            |
| 8                       | -0,07339     | -78,50732     | 3112,130     | 26,442           | 26,465            | 26,613            | 26,963            |
| 9                       | -0,96317     | -80,27876     | 551,024      | 16,421           | 16,436            | 16,423            | 16,379            |
| 10                      | -0,27040     | -78,50888     | 3184,521     | 26,936           | 27,115            | 27,038            | 27,367            |
| 11                      | -1,43772     | -78,54330     | 3877,840     | 27,55            | 27,183            | 27,799            | 26,761            |
| 12                      | -0,22908     | -78,51831     | 3015,370     | 26,943           | 27,089            | 27,109            | 27,258            |
| 13                      | 0,30442      | -78,04619     | 3835,944     | 26,782           | 27,058            | 26,935            | 28,087            |
| 14                      | -0,32644     | -76,91252     | 327,370      | 17,712           | 17,703            | 17,637            | 17,619            |
| 15                      | -0,23735     | -78,55716     | 3569,690     | 27,015           | 27,215            | 27,143            | 27,277            |
| 16                      | -2,69128     | -78,73145     | 3634,290     | 22,451           | 22,426            | 22,11             | 22,431            |
| 17                      | -1,90750     | -78,61064     | 3700,070     | 25,897           | 25,898            | 25,945            | 25,787            |
| 18                      | -0,93660     | -80,67116     | 21,570       | 14,326           | 14,309            | 14,35             | 14,252            |
| 19                      | -3,98895     | -79,19919     | 2116,823     | 18,049           | 18,284            | 18,322            | 18,728            |
| 20                      | -1,36748     | -79,90861     | 37,850       | 17,919           | 17,936            | 17,949            | 17,876            |
| 21                      | -1,04048     | -79,92402     | 297,649      | 17,647           | 17,638            | 17,664            | 17,582            |
| 22                      | -2,35870     | -79,53278     | 152,699      | 17,079           | 17,153            | 17,464            | 17,061            |
| 23                      | 0,00835      | -77,32222     | 1064,240     | 21,386           | 21,414            | 20,899            | 21,39             |
| 24                      | -0,07970     | -78,20902     | 4075,790     | 27,232           | 27,368            | 27,094            | 27,791            |
| 25                      | -1,17227     | -77,81718     | 1043,660     | 20,286           | 20,274            | 19,957            | 20,144            |
| 26                      | -2,15576     | -79,88814     | 21,806       | 17,204           | 17,179            | 17,269            | 17,3              |
| 27                      | -1,77897     | -79,46395     | 74,681       | 18,905           | 18,882            | 19,162            | 18,9              |
| 28                      | 0,95576      | -79,67366     | 266,750      | 15,599           | 15,676            | 15,701            | 15,822            |
| 29                      | -0,43546     | -80,18090     | 678,370      | 15,629           | 15,664            | 15,649            | 15,572            |
| 30                      | -1,94079     | -80,68090     | 136,520      | 14,127           | 14,038            | 13,998            | 13,775            |
| 31                      | -2,22119     | -80,93063     | 52,161       | 11,328           | 11,252            | 11,231            | 11,049            |

Os resultados das ondulações geoidais (*N*) resultantes nas diferentes malhas para o processo ALIVRE-BOU-RNAM estão resumidos na tabela 4.33.

TABELA 4.33. RESULTADOS DA ONDULAÇÃO GEOIDAL DO PROCESSO ALIVRE-BOURNAM

| Nº do Ponto de Controle | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) | N 5km (m) | N 10KM (m) | N 15KM (m) | N20KM (m) |
|-------------------------|--------------|---------------|--------------|-----------|------------|------------|-----------|
| 1                       | -2,32959     | -80,89473     | 55,187       | 7,465     | 7,169      | 6,73       | 5,416     |
| 2                       | -0,03657     | -78,48016     | 3514,720     | 26,957    | 27,036     | 27,169     | 27,281    |
| 3                       | 0,00021      | -78,42843     | 2636,034     | 27,154    | 27,205     | 27,411     | 27,442    |
| 4                       | -0,24447     | -78,54098     | 2924,024     | 27,291    | 27,487     | 27,389     | 27,353    |
| 5                       | -0,21515     | -78,49360     | 2892,724     | 27,428    | 27,572     | 27,484     | 27,759    |
| 6                       | -0,26280     | -78,41945     | 3188,916     | 27,723    | 28,022     | 27,853     | 28,103    |
| 7                       | -0,81395     | -78,62650     | 2913,570     | 27,745    | 27,785     | 27,873     | 28,059    |
| 8                       | -0,07339     | -78,50732     | 3112,130     | 27,064    | 27,126     | 27,279     | 27,315    |
| 9                       | -0,96317     | -80,27876     | 551,024      | 16,429    | 16,448     | 16,569     | 16,638    |
| 10                      | -0,27040     | -78,50888     | 3184,521     | 27,36     | 27,52      | 27,45      | 27,578    |
| 11                      | -1,43772     | -78,54330     | 3877,840     | 26,685    | 26,369     | 26,59      | 25,939    |
| 12                      | -0,22908     | -78,51831     | 3015,370     | 27,319    | 27,522     | 27,481     | 27,46     |
| 13                      | 0,30442      | -78,04619     | 3835,944     | 28,905    | 29,164     | 29,379     | 29,648    |
| 14                      | -0,32644     | -76,91252     | 327,370      | 17,984    | 17,985     | 17,968     | 17,957    |
| 15                      | -0,23735     | -78,55716     | 3569,690     | 27,179    | 27,396     | 27,289     | 27,237    |
| 16                      | -2,69128     | -78,73145     | 3634,290     | 22,567    | 22,577     | 22,301     | 22,578    |
| 17                      | -1,90750     | -78,61064     | 3700,070     | 25,39     | 25,499     | 25,405     | 25,45     |
| 18                      | -0,93660     | -80,67116     | 21,570       | 14,236    | 14,162     | 14,213     | 14,413    |
| 19                      | -3,98895     | -79,19919     | 2116,823     | 20,337    | 20,837     | 20,999     | 21,06     |
| 20                      | -1,36748     | -79,90861     | 37,850       | 19,165    | 19,241     | 19,224     | 19,282    |
| 21                      | -1,04048     | -79,92402     | 297,649      | 18,379    | 18,36      | 18,513     | 18,463    |
| 22                      | -2,35870     | -79,53278     | 152,699      | 19,348    | 19,414     | 19,731     | 19,336    |
| 23                      | 0,00835      | -77,32222     | 1064,240     | 22,254    | 22,228     | 21,837     | 22,164    |
| 24                      | -0,07970     | -78,20902     | 4075,790     | 28,789    | 28,923     | 28,834     | 28,858    |
| 25                      | -1,17227     | -77,81718     | 1043,660     | 20,168    | 20,242     | 19,947     | 20,228    |
| 26                      | -2,15576     | -79,88814     | 21,806       | 18,883    | 18,803     | 19,287     | 18,703    |
| 27                      | -1,77897     | -79,46395     | 74,681       | 20,735    | 20,71      | 21,025     | 20,81     |
| 28                      | 0,95576      | -79,67366     | 266,750      | 15,503    | 15,531     | 15,549     | 15,388    |
| 29                      | -0,43546     | -80,18090     | 678,370      | 14,631    | 14,723     | 14,718     | 14,638    |
| 30                      | -1,94079     | -80,68090     | 136,520      | 14,483    | 14,284     | 14,084     | 13,694    |
| 31                      | -2,22119     | -80,93063     | 52,161       | 8,884     | 8,471      | 8,27       | 7,08      |

Observando os valores das ondulações geoidais na tabela 4.32, pode-se indicar que os resultados obtidos com as diferentes malhas (intervalos de 5,10,15,20 km), não têm diferenças significativas e para fins práticos podem ser considerados como se fossem equivalentes. O mesmo comportamento acontece com os resultados obtidos e mostrados na tabela 4.33.

Comparando os resultados obtidos entre a tabela 4.32 e a tabela 4.33, pode-se indicar que os valores preditos nas respectivas malhas apresentam diferenças significativas em alguns pontos.

Para se determinar qual dos modelos geoidais calculados fornece os melhores resultados, serão feitas as respectivas avaliações e apresentados no capítulo 5.

## 5. GERAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO GEOIDAL

No capítulo 4 foi mostrado que a integral de Stokes pode ser aplicada na determinação da ondulação geoidal residual a partir da anomalia residual, conjuntamente com as ondulações geoidais do modelo do geopotencial EGM96, e com o efeito indireto do terreno sobre o Geóide, pode-se determinar as ondulações geoidais finais mediante a aplicação da técnica “remover-restaurar”. Neste capítulo, são apresentadas as avaliações realizadas nos modelos geoidais calculados, usando os dados de controle mostrados no capítulo 3.

As avaliações das ondulações resultantes são feitas mediante duas formas: A primeira avaliação mediante forma absoluta nos pontos de controle, e a segunda mediante uma avaliação relativa nos mesmos pontos de controle. Os modelos foram designados mediante a seguinte convenção:

**MODELO 1 – ALIVRE-RNAM:** A geração da malha de anomalia do Ar-Livre foi realizada mediante técnica de RNA na qual foram utilizadas as respectivas RNAMs treinadas na predição das anomalias e em forma direta (seção 4.3.2.1).

**MODELO 2 – ALIVRE-BOU-RNAM:** Para gerar a malha de Anomalia de Ar-Livre, inicialmente foi gerada uma malha de anomalia de Bouguer a partir das RNAMs treinadas, e posteriormente, foram determinadas as anomalias de Ar-Livre a partir das correspondentes anomalias de Bouguer.

### 5.1 AVALIAÇÃO ABSOLUTA

A avaliação absoluta foi efetuada nos 31 pontos de controle existentes no interior da área de trabalho, e determinada de acordo à equação (3.2) do capítulo 3.

As tabelas desta avaliação indicam na primeira coluna o Nº de identificação e na sequência, 4 colunas para cada modelo gerado. Estas colunas contêm a diferença entre a altura obtida com GPS/RNs e a altura geoidal do modelo para as diferentes malhas. As últimas 4 linhas de cada tabela, apresentam os valores das diferenças obtidas, em termos de: média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo.

Na tabela 5.1 e na figura 5.1, são mostrados os resultados das diferenças das ondulações geoidais obtidas com o Modelo 1.

TABELA 5.1 DIFERENÇAS DAS ONDULAÇÕES GEOIDAIS PARA O MODELO 1

| Nº Ponto Controle        | <i>DN</i> 5km (m) | <i>DN</i> 10km (m) | <i>DN</i> 15km (m) | <i>DN</i> 20km (m) |
|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1                        | -0,17             | -0,25              | -0,23              | -0,33              |
| 2                        | -0,56             | -0,55              | -0,43              | 0,10               |
| 3                        | -1,14             | -1,11              | -0,98              | -0,37              |
| 4                        | -0,78             | -0,58              | -0,67              | -0,40              |
| 5                        | -0,71             | -0,52              | -0,66              | -0,16              |
| 6                        | -0,48             | -0,21              | -0,47              | 0,03               |
| 7                        | 0,54              | 0,57               | 0,87               | 1,25               |
| 8                        | -1,06             | -1,04              | -0,89              | -0,54              |
| 9                        | 0,46              | 0,48               | 0,46               | 0,42               |
| 10                       | -0,41             | -0,23              | -0,30              | 0,02               |
| 11                       | 0,90              | 0,54               | 1,15               | 0,11               |
| 12                       | -0,87             | -0,72              | -0,70              | -0,55              |
| 13                       | -0,72             | -0,45              | -0,57              | 0,58               |
| 14                       | -0,55             | -0,56              | -0,62              | -0,64              |
| 15                       | -0,98             | -0,78              | -0,85              | -0,71              |
| 16                       | -1,52             | -1,55              | -1,86              | -1,54              |
| 17                       | -1,72             | -1,72              | -1,67              | -1,83              |
| 18                       | 0,21              | 0,19               | 0,23               | 0,14               |
| 19                       | -0,15             | 0,08               | 0,12               | 0,52               |
| 20                       | -0,65             | -0,63              | -0,62              | -0,70              |
| 21                       | -0,93             | -0,94              | -0,92              | -1,00              |
| 22                       | -0,03             | 0,04               | 0,35               | -0,05              |
| 23                       | -0,77             | -0,75              | -1,26              | -0,77              |
| 24                       | -0,40             | -0,27              | -0,54              | 0,15               |
| 25                       | 0,50              | 0,49               | 0,17               | 0,36               |
| 26                       | -0,62             | -0,64              | -0,55              | -0,52              |
| 27                       | -0,11             | -0,13              | 0,15               | -0,11              |
| 28                       | 0,54              | 0,62               | 0,64               | 0,76               |
| 29                       | -1,44             | -1,40              | -1,42              | -1,49              |
| 30                       | -1,02             | -1,10              | -1,14              | -1,37              |
| 31                       | -0,22             | -0,29              | -0,31              | -0,50              |
| <b>Média (m)</b>         | <b>-0,48</b>      | <b>-0,43</b>       | <b>-0,44</b>       | <b>-0,29</b>       |
| <b>Desvio Padrão (m)</b> | <b>0,65</b>       | <b>0,62</b>        | <b>0,71</b>        | <b>0,70</b>        |
| <b>Máximo (m)</b>        | <b>0,90</b>       | <b>0,57</b>        | <b>1,15</b>        | <b>1,25</b>        |
| <b>Mínimo (m)</b>        | <b>-1,72</b>      | <b>-1,72</b>       | <b>-1,86</b>       | <b>-1,83</b>       |

Na tabela 5.2, e na figura 5.2 são mostrados os resultados das diferenças das ondulações geoidais obtidas com o Modelo 2.

TABELA 5.2 DIFERENÇAS DAS ONDULAÇÕES GEOIDAIS PARA O MODELO 2

| Nº Ponto Controle        | <i>DN</i> 5km (m) | <i>DN</i> 10km (m) | <i>DN</i> 15km (m) | <i>DN</i> 20km (m) |
|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1                        | -3,82             | -4,12              | -4,56              | -5,87              |
| 2                        | 0,21              | 0,29               | 0,42               | 0,53               |
| 3                        | -0,11             | -0,06              | 0,15               | 0,18               |
| 4                        | -0,53             | -0,33              | -0,43              | -0,46              |
| 5                        | -0,16             | -0,02              | -0,11              | 0,17               |
| 6                        | 0,23              | 0,53               | 0,36               | 0,61               |
| 7                        | 0,08              | 0,12               | 0,21               | 0,39               |
| 8                        | -0,44             | -0,38              | -0,23              | -0,19              |
| 9                        | 0,47              | 0,49               | 0,61               | 0,68               |
| 10                       | 0,02              | 0,18               | 0,11               | 0,24               |
| 11                       | 0,04              | -0,28              | -0,06              | -0,71              |
| 12                       | -0,49             | -0,29              | -0,33              | -0,35              |
| 13                       | 1,40              | 1,66               | 1,87               | 2,14               |
| 14                       | -0,28             | -0,27              | -0,29              | -0,30              |
| 15                       | -0,81             | -0,60              | -0,70              | -0,75              |
| 16                       | -1,40             | -1,39              | -1,67              | -1,39              |
| 17                       | -2,23             | -2,12              | -2,21              | -2,17              |
| 18                       | 0,12              | 0,05               | 0,10               | 0,30               |
| 19                       | 2,13              | 2,63               | 2,80               | 2,86               |
| 20                       | 0,59              | 0,67               | 0,65               | 0,71               |
| 21                       | -0,20             | -0,22              | -0,07              | -0,12              |
| 22                       | 2,24              | 2,30               | 2,62               | 2,22               |
| 23                       | 0,09              | 0,07               | -0,32              | 0,00               |
| 24                       | 1,15              | 1,29               | 1,20               | 1,22               |
| 25                       | 0,38              | 0,45               | 0,16               | 0,44               |
| 26                       | 1,06              | 0,98               | 1,46               | 0,88               |
| 27                       | 1,72              | 1,70               | 2,01               | 1,80               |
| 28                       | 0,44              | 0,47               | 0,49               | 0,33               |
| 29                       | -2,43             | -2,34              | -2,35              | -2,43              |
| 30                       | -0,66             | -0,86              | -1,06              | -1,45              |
| 31                       | -2,66             | -3,07              | -3,27              | -4,46              |
| <b>Média (m)</b>         | <b>-0,12</b>      | <b>-0,08</b>       | <b>-0,08</b>       | <b>-0,16</b>       |
| <b>Desvio Padrão (m)</b> | <b>1,34</b>       | <b>1,44</b>        | <b>1,57</b>        | <b>1,78</b>        |
| <b>Máximo (m)</b>        | <b>2,24</b>       | <b>2,63</b>        | <b>2,80</b>        | <b>2,86</b>        |
| <b>Mínimo (m)</b>        | <b>-3,82</b>      | <b>-4,12</b>       | <b>-4,56</b>       | <b>-5,87</b>       |



## 5.2 AVALIAÇÃO RELATIVA

A avaliação relativa foi efetuada através da comparação entre diferenças de ondulações de acordo a equação (3.5). As tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, mostram os resultados obtidos para o Modelo 1, com as malhas de 5km, 10km, 15km, 20km, respectivamente. Nesta avaliação, cada tabela possui as seguintes colunas:

- N° de identificação ( coluna 1);
- Nomes das estações da linha relativa (coluna 2);
- Distância entre as estações da linha (coluna 3);
- Diferença de alturas geoidais GPS/RNs (coluna 4);
- Diferença de alturas geoidais obtidas com o modelo correspondente (coluna 5);
- Diferença das alturas mencionadas (resultado da diferença entre a quinta e quarta coluna);
- Resultado da divisão a quinta coluna pela distância entre estações, para obtenção da diferença em termos de ppm (parte por milhão).

Nas últimas duas linhas da tabela são mostrados os valores da média e do desvio padrão do conjunto.

TABELA 5.3 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO1 PARA MALHA DE 5km

| Nº | Linha-Base                  | Distância<br>(km) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) | $\Delta N_{GL}$<br>(m)   | $\delta DN$<br>(m) | ppm<br>05km |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|
| 1  | IGM-Casituaga               | 19,82             | -0,85                   | -0,69                    | 0,16               | 8,07        |
| 2  | Hospital del sur-Catequilla | 29,83             | -0,55                   | -0,91                    | 0,36               | 12,07       |
| 3  | IGM-Pambamarca              | 35,08             | 0,04                    | 0,35                     | 0,31               | 8,84        |
| 4  | Latacunga-Ilalo             | 65,19             | -0,18                   | -1,2                     | 1,02               | 15,65       |
| 5  | IGM-Redondo                 | 76,08             | -0,1                    | -0,1                     | 0,00               | 0,00        |
| 6  | Zagrun-Yausay               | 87,75             | -3,65                   | -3,45                    | 0,20               | 2,28        |
| 7  | Latacunga-Culaurco          | 98,46             | -7,88                   | -7,92                    | 0,04               | 0,41        |
| 8  | IGM-Lumbaqui                | 132,77            | -5,44                   | -5,49                    | 0,05               | 0,38        |
| 9  | Latacunga-Balzar            | 155,33            | -9,1                    | -10,28                   | 1,18               | 7,60        |
| 10 | IGM-Sacha                   | 176,49            | -9,34                   | -9,17                    | 0,17               | 0,96        |
| 11 | Latacunga-Sacha             | 198,32            | -9,41                   | -10,49                   | 1,08               | 5,45        |
| 12 | IGM-Balzar                  | 202,65            | -9,03                   | -8,96                    | 0,07               | 0,35        |
| 13 | IGM-Minaya                  | 215,3             | -11,64                  | -10,46                   | 1,18               | 5,48        |
| 14 | Latacunga-Manta             | 228,05            | -13,55                  | -13,88                   | 0,33               | 1,45        |
| 15 | Loja UTPL-Cachari           | 246,18            | 0,8                     | 0,86                     | 0,06               | 0,24        |
| 16 | IGM-Manta                   | 255,24            | -13,48                  | -12,55                   | 0,93               | 3,64        |
| 17 | Loja UTPL-Coral             | 274,35            | -6,66                   | -6,72                    | 0,06               | 0,22        |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona         | 280,08            | -3,07                   | -3,92                    | 0,85               | 3,03        |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul            | 291,5             | 8,44                    | 9,5                      | 1,06               | 3,64        |
| 20 | Loja UTPL-Balzar            | 300,44            | 0,37                    | -0,13                    | 0,50               | 1,66        |
| 21 | IGM-Barcelona               | 309,36            | -12,46                  | -12,75                   | 0,29               | 0,94        |
| 22 | Loja UTPL-El Desvio         | 335,88            | 0,37                    | -0,4                     | 0,77               | 2,29        |
| 23 | IGM-Anconcito               | 355,11            | -16,3                   | -15,76                   | 0,54               | 1,52        |
| 24 | Loja UTPL-Manta             | 375,13            | -4,09                   | -3,72                    | 0,37               | 0,99        |
| 25 | Anconcito-Pambamarca        | 388,97            | 16,35                   | 16,11                    | 0,24               | 0,62        |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo       | 407,84            | -1,15                   | -2,42                    | 1,27               | 3,11        |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle         | 418,39            | 9,13                    | 8,89                     | 0,24               | 0,57        |
| 28 | Anconcito-Redondo           | 430,57            | 16,21                   | 15,66                    | 0,55               | 1,28        |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua         | 444,41            | 8,54                    | 8,14                     | 0,40               | 0,90        |
| 30 | Loja UTPL-Catequilla        | 449,43            | 9,06                    | 8,07                     | 0,99               | 2,20        |
| 31 | Loja UTPL-Sacha             | 478,21            | 0,05                    | -0,34                    | 0,39               | 0,82        |
| 32 | Loja UTPL-Redondo           | 491,87            | 9,3                     | 8,73                     | 0,57               | 1,16        |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas        | 549,24            | -3,07                   | -2,45                    | 0,62               | 1,13        |
|    |                             |                   |                         |                          |                    |             |
|    |                             |                   |                         | <b>Média</b>             | <b>0,51</b>        | <b>3,00</b> |
|    |                             |                   |                         | <b>Desvio<br/>padrão</b> | <b>0,39</b>        | <b>3,67</b> |

TABELA 5.4 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO1 PARA MALHA DE 10km

| Nº | Linha-Base                  | Distância<br>(km) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) | $\Delta N_{GL}$<br>(m) | $\delta \quad DN$<br>(m) | ppm<br>10km |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------|
| 1  | IGM-Casituaga               | 19,82             | -0,85                   | -0,87                  | 0,02                     | 1,01        |
| 2  | Hospital del sur-Catequilla | 29,83             | -0,55                   | -1,09                  | 0,54                     | 18,10       |
| 3  | IGM-Pambamarca              | 35,08             | 0,04                    | 0,3                    | 0,26                     | 7,41        |
| 4  | Latacunga-Ilalo             | 65,19             | -0,18                   | -0,96                  | 0,78                     | 11,97       |
| 5  | IGM-Redondo                 | 76,08             | -0,1                    | -0,01                  | 0,09                     | 1,18        |
| 6  | Zagrun-Yausay               | 87,75             | -3,65                   | -3,47                  | 0,18                     | 2,05        |
| 7  | Latacunga-Culaurco          | 98,46             | -7,88                   | -7,96                  | 0,08                     | 0,81        |
| 8  | IGM-Lumbacui                | 132,77            | -5,44                   | -5,66                  | 0,22                     | 1,66        |
| 9  | Latacunga-Balzar            | 155,33            | -9,1                    | -10,3                  | 1,2                      | 7,73        |
| 10 | IGM-Sacha                   | 176,49            | -9,34                   | -9,37                  | 0,03                     | 0,17        |
| 11 | Latacunga-Sacha             | 198,32            | -9,41                   | -10,53                 | 1,12                     | 5,65        |
| 12 | IGM-Balzar                  | 202,65            | -9,03                   | -9,14                  | 0,11                     | 0,54        |
| 13 | IGM-Minaya                  | 215,3             | -11,64                  | -10,64                 | 1                        | 4,64        |
| 14 | Latacunga-Manta             | 228,05            | -13,55                  | -13,93                 | 0,38                     | 1,67        |
| 15 | Loja UTPL-Cachari           | 246,18            | 0,8                     | 0,6                    | 0,2                      | 0,81        |
| 16 | IGM-Manta                   | 255,24            | -13,48                  | -12,76                 | 0,72                     | 2,82        |
| 17 | Loja UTPL-Coral             | 274,35            | -6,66                   | -7,03                  | 0,37                     | 1,35        |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona         | 280,08            | -3,07                   | -4,25                  | 1,18                     | 4,21        |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul            | 291,5             | 8,44                    | 8,9                    | 0,46                     | 1,58        |
| 20 | Loja UTPL-Balzar            | 300,44            | 0,37                    | -0,35                  | 0,72                     | 2,40        |
| 21 | IGM-Barcelona               | 309,36            | -12,46                  | -13,03                 | 0,57                     | 1,84        |
| 22 | Loja UTPL-El Desvio         | 335,88            | 0,37                    | -0,65                  | 1,02                     | 3,04        |
| 23 | IGM-Anconcito               | 355,11            | -16,3                   | -16,03                 | 0,27                     | 0,76        |
| 24 | Loja UTPL-Manta             | 375,13            | -4,09                   | -3,98                  | 0,11                     | 0,29        |
| 25 | Anconcito-Pambamarca        | 388,97            | 16,35                   | 16,33                  | 0,02                     | 0,05        |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo       | 407,84            | -1,15                   | -2,62                  | 1,47                     | 3,60        |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle         | 418,39            | 9,13                    | 8,83                   | 0,3                      | 0,72        |
| 28 | Anconcito-Redondo           | 430,57            | 16,21                   | 16,02                  | 0,19                     | 0,44        |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua         | 444,41            | 8,54                    | 7,92                   | 0,62                     | 1,40        |
| 30 | Loja UTPI-Catequilla        | 449,43            | 9,06                    | 7,86                   | 1,2                      | 2,67        |
| 31 | Loja UTPL-Sacha             | 478,21            | 0,05                    | -0,58                  | 0,63                     | 1,32        |
| 32 | Loja UTPL-Redondo           | 491,87            | 9,3                     | 8,77                   | 0,53                     | 1,08        |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas        | 549,24            | -3,07                   | -2,61                  | 0,46                     | 0,84        |
|    |                             |                   |                         | <b>Média</b>           | <b>0,52</b>              | <b>2,90</b> |
|    |                             |                   |                         | <b>Desvio padrão</b>   | <b>0,41</b>              | <b>3,75</b> |

TABELA 5.5 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO1 PARA MALHA DE 15km

| Nº | Linha-Base                  | Distância<br>(km) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) | $\Delta N_{GL}$<br>(m)   | $\delta DN$<br>(m) | ppm<br>15km |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|
| 1  | IGM-Casituaga               | 19,82             | -0,85                   | -0,62                    | 0,23               | 11,60       |
| 2  | Hospital del sur-Catequilla | 29,83             | -0,55                   | -0,86                    | 0,31               | 10,39       |
| 3  | IGM-Pambamarca              | 35,08             | 0,04                    | 0,16                     | 0,12               | 3,42        |
| 4  | Latacunga-Ilalo             | 65,19             | -0,18                   | -1,52                    | 1,34               | 20,56       |
| 5  | IGM-Redondo                 | 76,08             | -0,1                    | 0                        | 0,1                | 1,31        |
| 6  | Zagrun-Yausay               | 87,75             | -3,65                   | -3,84                    | 0,19               | 2,17        |
| 7  | Latacunga-Culaurco          | 98,46             | -7,88                   | -8,58                    | 0,7                | 7,11        |
| 8  | IGM-Lumbacui                | 132,77            | -5,44                   | -6,04                    | 0,6                | 4,52        |
| 9  | Latacunga-Balzar            | 155,33            | -9,1                    | -10,59                   | 1,49               | 9,59        |
| 10 | IGM-Sacha                   | 176,49            | -9,34                   | -9,3                     | 0,04               | 0,23        |
| 11 | Latacunga-Sacha             | 198,32            | -9,41                   | -10,9                    | 1,49               | 7,51        |
| 12 | IGM-Balzar                  | 202,65            | -9,03                   | -8,99                    | 0,04               | 0,20        |
| 13 | IGM-Minaya                  | 215,3             | -11,64                  | -10,512                  | 1,128              | 5,24        |
| 14 | Latacunga-Manta             | 228,05            | -13,55                  | -14,12                   | 0,57               | 2,50        |
| 15 | Loja UTPL-Cachari           | 246,18            | 0,8                     | 0,84                     | 0,04               | 0,16        |
| 16 | IGM-Manta                   | 255,24            | -13,48                  | -12,58                   | 0,9                | 3,53        |
| 17 | Loja UTPL-Coral             | 274,35            | -6,66                   | -7,09                    | 0,43               | 1,57        |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona         | 280,08            | -3,07                   | -4,32                    | 1,25               | 4,46        |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul            | 291,5             | 8,44                    | 9,48                     | 1,04               | 3,57        |
| 20 | Loja UTPL-Balzar            | 300,44            | 0,37                    | -0,37                    | 0,74               | 2,46        |
| 21 | IGM-Barcelona               | 309,36            | -12,46                  | -12,94                   | 0,48               | 1,55        |
| 22 | Loja UTPL-El Desvio         | 335,88            | 0,37                    | -0,66                    | 1,03               | 3,07        |
| 23 | IGM-Anconcito               | 355,11            | -16,3                   | -15,88                   | 0,42               | 1,18        |
| 24 | Loja UTPL-Manta             | 375,13            | -4,09                   | -3,97                    | 0,12               | 0,32        |
| 25 | Anconcito-Pambamarca        | 388,97            | 16,35                   | 16,03                    | 0,32               | 0,82        |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo       | 407,84            | -1,15                   | -2,67                    | 1,52               | 3,73        |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle         | 418,39            | 9,13                    | 8,72                     | 0,41               | 0,98        |
| 28 | Anconcito-Redondo           | 430,57            | 16,21                   | 15,88                    | 0,33               | 0,77        |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua         | 444,41            | 8,54                    | 7,99                     | 0,55               | 1,24        |
| 30 | Loja UTPL-Catequilla        | 449,43            | 9,06                    | 7,96                     | 1,1                | 2,45        |
| 31 | Loja UTPL-Sacha             | 478,21            | 0,05                    | -0,68                    | 0,73               | 1,53        |
| 32 | Loja UTPL-Redondo           | 491,87            | 9,3                     | 8,61                     | 0,69               | 1,40        |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas        | 549,24            | -3,07                   | -2,62                    | 0,45               | 0,82        |
|    |                             |                   |                         |                          |                    |             |
|    |                             |                   |                         | <b>Média</b>             | <b>0,63</b>        | <b>3,70</b> |
|    |                             |                   |                         | <b>Desvio<br/>Padrão</b> | <b>0,4 6</b>       | <b>4,26</b> |

TABELA 5.6 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO1 PARA MALHA DE 20km

| Nº | Linha-Base                  | Distância<br>(km) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) | $\Delta N_{GL}$<br>(m)   | $\delta DN$<br>(m) | ppm<br>20km |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|
| 1  | IGM-Casituaga               | 19,82             | -0,85                   | -0,59                    | 0,26               | 13,12       |
| 2  | Hospital del sur-Catequilla | 29,83             | -0,55                   | -0,52                    | 0,03               | 1,01        |
| 3  | IGM-Pambamarca              | 35,08             | 0,04                    | 0,36                     | 0,32               | 9,12        |
| 4  | Latacunga-Ilalo             | 65,19             | -0,18                   | -1,4                     | 1,22               | 18,71       |
| 5  | IGM-Redondo                 | 76,08             | -0,1                    | 0,65                     | 0,75               | 9,86        |
| 6  | Zagrun-Yausay               | 87,75             | -3,65                   | -3,36                    | 0,29               | 3,30        |
| 7  | Latacunga-Culaurco          | 98,46             | -7,88                   | -7,29                    | 0,59               | 5,99        |
| 8  | IGM-Lumbaqui                | 132,77            | -5,44                   | -6,04                    | 0,6                | 4,52        |
| 9  | Latacunga-Balzar            | 155,33            | -9,1                    | -11,04                   | 1,94               | 12,49       |
| 10 | IGM-Sacha                   | 176,49            | -9,34                   | -9,82                    | 0,48               | 2,72        |
| 11 | Latacunga-Sacha             | 198,32            | -9,41                   | -11,3                    | 1,89               | 9,53        |
| 12 | IGM-Balzar                  | 202,65            | -9,03                   | -9,56                    | 0,53               | 2,62        |
| 13 | IGM-Minaya                  | 215,3             | -11,64                  | -11,06                   | 0,58               | 2,69        |
| 14 | Latacunga-Manta             | 228,05            | -13,55                  | -14,67                   | 1,12               | 4,91        |
| 15 | Loja UTPL-Cachari           | 246,18            | 0,8                     | 0,17                     | 0,63               | 2,56        |
| 16 | IGM-Manta                   | 255,24            | -13,48                  | -13,18                   | 0,3                | 1,18        |
| 17 | Loja UTPL-Coral             | 274,35            | -6,66                   | -7,68                    | 1,02               | 3,72        |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona         | 280,08            | -3,07                   | -4,94                    | 1,87               | 6,68        |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul            | 291,5             | 8,44                    | 8,03                     | 0,41               | 1,41        |
| 20 | Loja UTPL-Balzar            | 300,44            | 0,37                    | -0,85                    | 1,22               | 4,06        |
| 21 | IGM-Barcelona               | 309,36            | -12,46                  | -13,66                   | 1,2                | 3,88        |
| 22 | Loja UTPL-EI Desvio         | 335,88            | 0,37                    | -1,15                    | 1,52               | 4,53        |
| 23 | IGM-Anconcito               | 355,11            | -16,3                   | -16,47                   | 0,17               | 0,48        |
| 24 | Loja UTPL-Manta             | 375,13            | -4,09                   | -4,48                    | 0,39               | 1,04        |
| 25 | Anconcito-Pambamarca        | 388,97            | 16,35                   | 16,83                    | 0,48               | 1,23        |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo       | 407,84            | -1,15                   | -3,16                    | 2,01               | 4,93        |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle         | 418,39            | 9,13                    | 8,64                     | 0,49               | 1,17        |
| 28 | Anconcito-Redondo           | 430,57            | 16,21                   | 17,12                    | 0,91               | 2,11        |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua         | 444,41            | 8,54                    | 8,12                     | 0,42               | 0,95        |
| 30 | Loja UTPI-Catequilla        | 449,43            | 9,06                    | 8,16                     | 0,9                | 2,00        |
| 31 | Loja UTPL-Sacha             | 478,21            | 0,05                    | -1,11                    | 1,16               | 2,43        |
| 32 | Loja UTPL-Redondo           | 491,87            | 9,3                     | 9,36                     | 0,06               | 0,12        |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas        | 549,24            | -3,07                   | -2,91                    | 0,16               | 0,29        |
|    |                             |                   |                         |                          |                    |             |
|    |                             |                   |                         | <b>Média</b>             | <b>0,79</b>        | <b>4,40</b> |
|    |                             |                   |                         | <b>Desvio<br/>Padrão</b> | <b>0,57</b>        | <b>4,28</b> |

As tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, mostram os resultados obtidos para o Modelo 2, com malhas de 5km, 10km, 15km, 20km, respectivamente.

TABELA 5.7 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO2 PARA MALHA DE 05km

| Nº | Linha-Base                      | Distância<br>(km) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) | $\Delta N_{GL}$<br>(m)   | $\delta DN$<br>(m) | ppm<br>05km |
|----|---------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|
| 1  | IGM-Casituaga                   | 19,82             | -0,85                   | -0,47                    | 0,38               | 19,17       |
| 2  | Hospital del sur-<br>Catequilla | 29,83             | -0,55                   | -0,14                    | 0,41               | 13,74       |
| 3  | IGM-Pambamarca                  | 35,08             | 0,04                    | 1,36                     | 1,32               | 37,63       |
| 4  | Latacunga-Ilalo                 | 65,19             | -0,18                   | -0,02                    | 0,16               | 2,45        |
| 5  | IGM-Redondo                     | 76,08             | -0,1                    | 1,48                     | 1,58               | 20,77       |
| 6  | Zagrun-Yausay                   | 87,75             | -3,65                   | -2,82                    | 0,83               | 9,46        |
| 7  | Latacunga-Culaurco              | 98,46             | -7,88                   | -7,58                    | 0,3                | 3,05        |
| 8  | IGM-Lumbacui                    | 132,77            | -5,44                   | -5,17                    | 0,27               | 2,03        |
| 9  | Latacunga-Balzar                | 155,33            | -9,1                    | -8,58                    | 0,52               | 3,35        |
| 10 | IGM-Sacha                       | 176,49            | -9,34                   | -9,44                    | 0,1                | 0,57        |
| 11 | Latacunga-Sacha                 | 198,32            | -9,41                   | -9,76                    | 0,35               | 1,76        |
| 12 | IGM-Balzar                      | 202,65            | -9,03                   | -8,26                    | 0,77               | 3,80        |
| 13 | IGM-Minaya                      | 215,3             | -11,64                  | -11                      | 0,64               | 2,97        |
| 14 | Latacunga-Manta                 | 228,05            | -13,55                  | -13,51                   | 0,04               | 0,18        |
| 15 | Loja UTPL-Cachari               | 246,18            | 0,8                     | 0,4                      | 0,4                | 1,62        |
| 16 | IGM-Manta                       | 255,24            | -13,48                  | -13,19                   | 0,29               | 1,14        |
| 17 | Loja UTPL-Coral                 | 274,35            | -6,66                   | -11,45                   | 4,79               | 17,46       |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona             | 280,08            | -3,07                   | -5,85                    | 2,78               | 9,93        |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul                | 291,5             | 8,44                    | 6,35                     | 2,09               | 7,17        |
| 20 | Loja UTPL-Balzar                | 300,44            | 0,37                    | -1,17                    | 1,54               | 5,13        |
| 21 | IGM-Barcelona                   | 309,36            | -12,46                  | -12,94                   | 0,48               | 1,55        |
| 22 | Loja UTPL-EI Desvio             | 335,88            | 0,37                    | -1,96                    | 2,33               | 6,94        |
| 23 | IGM-Anconcito                   | 355,11            | -16,3                   | -19,96                   | 3,66               | 10,31       |
| 24 | Loja UTPL-Manta                 | 375,13            | -4,09                   | -6,1                     | 2,01               | 5,36        |
| 25 | Anconcito-Pambamarca            | 388,97            | 16,35                   | 21,32                    | 4,97               | 12,78       |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo           | 407,84            | -1,15                   | -5,71                    | 4,56               | 11,18       |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle             | 418,39            | 9,13                    | 7,02                     | 2,11               | 5,04        |
| 28 | Anconcito-Redondo               | 430,57            | 16,21                   | 21,44                    | 5,23               | 12,15       |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua             | 444,41            | 8,54                    | 6,62                     | 1,92               | 4,32        |
| 30 | Loja UTPI-Catequilla            | 449,43            | 9,06                    | 6,82                     | 2,24               | 4,98        |
| 31 | Loja UTPL-Sacha                 | 478,21            | 0,05                    | -2,35                    | 2,4                | 5,02        |
| 32 | Loja UTPL-Redondo               | 491,87            | 9,3                     | 8,57                     | 0,73               | 1,48        |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas            | 549,24            | -3,07                   | -4,83                    | 1,76               | 3,20        |
|    |                                 |                   |                         |                          |                    |             |
|    |                                 |                   |                         | <b>Média</b>             | <b>1,64</b>        | <b>7,51</b> |
|    |                                 |                   |                         | <b>Desvio<br/>Padrão</b> | <b>1,53</b>        | <b>7,71</b> |



TABELA 5.8 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO2 PARA MALHA DE 10km

| Nº | Linha-Base                  | Distância<br>(km) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) | $\Delta N_{GL}$<br>(m)   | $\delta DN$<br>(m) | ppm<br>10km |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|
| 1  | IGM-Casituaga               | 19,82             | -0,85                   | -0,53                    | 0,32               | 16,15       |
| 2  | Hospital del sur-Catequilla | 29,83             | -0,55                   | -0,28                    | 0,27               | 9,05        |
| 3  | IGM-Pambamarca              | 35,08             | 0,04                    | 1,35                     | 1,31               | 37,34       |
| 4  | Latacunga-Ilalo             | 65,19             | -0,18                   | 0,24                     | 0,42               | 6,44        |
| 5  | IGM-Redondo                 | 76,08             | -0,1                    | 1,59                     | 1,69               | 22,21       |
| 6  | Zagrun-Yausay               | 87,75             | -3,65                   | -2,92                    | 0,73               | 8,32        |
| 7  | Latacunga-Culaurco          | 98,46             | -7,88                   | -7,54                    | 0,34               | 3,45        |
| 8  | IGM-Lumbaqui                | 132,77            | -5,44                   | -5,34                    | 0,1                | 0,75        |
| 9  | Latacunga-Balzar            | 155,33            | -9,1                    | -8,54                    | 0,56               | 3,61        |
| 10 | IGM-Sacha                   | 176,49            | -9,34                   | -9,59                    | 0,25               | 1,42        |
| 11 | Latacunga-Sacha             | 198,32            | -9,41                   | -9,8                     | 0,39               | 1,97        |
| 12 | IGM-Balzar                  | 202,65            | -9,03                   | -8,33                    | 0,7                | 3,45        |
| 13 | IGM-Minaya                  | 215,3             | -11,64                  | -11,12                   | 0,52               | 2,42        |
| 14 | Latacunga-Manta             | 228,05            | -13,55                  | -13,62                   | 0,07               | 0,31        |
| 15 | Loja UTPL-Cachari           | 246,18            | 0,8                     | -0,13                    | 0,93               | 3,78        |
| 16 | IGM-Manta                   | 255,24            | -13,48                  | -13,41                   | 0,07               | 0,27        |
| 17 | Loja UTPL-Coral             | 274,35            | -6,66                   | -12,37                   | 5,71               | 20,81       |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona         | 280,08            | -3,07                   | -6,55                    | 3,48               | 12,43       |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul            | 291,5             | 8,44                    | 5,53                     | 2,91               | 9,98        |
| 20 | Loja UTPL-Balzar            | 300,44            | 0,37                    | -1,6                     | 1,97               | 6,56        |
| 21 | IGM-Barcelona               | 309,36            | -12,46                  | -13,29                   | 0,83               | 2,68        |
| 22 | Loja UTPL-El Desvio         | 335,88            | 0,37                    | -2,48                    | 2,85               | 8,49        |
| 23 | IGM-Anconcito               | 355,11            | -16,3                   | -20,4                    | 4,1                | 11,55       |
| 24 | Loja UTPL-Manta             | 375,13            | -4,09                   | -6,68                    | 2,59               | 6,90        |
| 25 | Anconcito-Pambamarca        | 388,97            | 16,35                   | 21,75                    | 5,4                | 13,88       |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo       | 407,84            | -1,15                   | -6,11                    | 4,96               | 12,16       |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle         | 418,39            | 9,13                    | 6,68                     | 2,45               | 5,86        |
| 28 | Anconcito-Redondo           | 430,57            | 16,21                   | 22                       | 5,79               | 13,45       |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua         | 444,41            | 8,54                    | 6,2                      | 2,34               | 5,27        |
| 30 | Loja UTPL-Catequilla        | 449,43            | 9,06                    | 6,37                     | 2,69               | 5,99        |
| 31 | Loja UTPL-Sacha             | 478,21            | 0,05                    | -2,85                    | 2,9                | 6,06        |
| 32 | Loja UTPL-Redondo           | 491,87            | 9,3                     | 8,33                     | 0,97               | 1,97        |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas        | 549,24            | -3,07                   | -5,31                    | 2,24               | 4,08        |
|    |                             |                   |                         |                          |                    |             |
|    |                             |                   |                         | <b>Média</b>             | <b>1,90</b>        | <b>8,15</b> |
|    |                             |                   |                         | <b>Desvio<br/>Padrão</b> | <b>1,75</b>        | <b>7,66</b> |

TABELA 5.9 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO2 PARA MALHA DE 15km

| Nº | Linha-Base                  | Distância<br>(km) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) | $\Delta N_{GL}$<br>(m) | $\delta DN$<br>(m) | ppm<br>15km |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|-------------|
| 1  | IGM-Casituaga               | 19,82             | -0,85                   | -0,32                  | 0,53               | 26,74       |
| 2  | Hospital del sur-Catequilla | 29,83             | -0,55                   | 0,02                   | 0,57               | 19,11       |
| 3  | IGM-Pambamarca              | 35,08             | 0,04                    | 1,35                   | 1,31               | 37,34       |
| 4  | Latacunga-Ilalo             | 65,19             | -0,18                   | -0,02                  | 0,16               | 2,45        |
| 5  | IGM-Redondo                 | 76,08             | -0,1                    | 1,9                    | 2                  | 26,29       |
| 6  | Zagrun-Yausay               | 87,75             | -3,65                   | -3,1                   | 0,55               | 6,27        |
| 7  | Latacunga-Culaurco          | 98,46             | -7,88                   | -7,93                  | 0,05               | 0,51        |
| 8  | IGM-Lumbacui                | 132,77            | -5,44                   | -5,65                  | 0,21               | 1,58        |
| 9  | Latacunga-Balzar            | 155,33            | -9,1                    | -8,65                  | 0,45               | 2,90        |
| 10 | IGM-Sacha                   | 176,49            | -9,34                   | -9,52                  | 0,18               | 1,02        |
| 11 | Latacunga-Sacha             | 198,32            | -9,41                   | -9,9                   | 0,49               | 2,47        |
| 12 | IGM-Balzar                  | 202,65            | -9,03                   | -8,26                  | 0,77               | 3,80        |
| 13 | IGM-Minaya                  | 215,3             | -11,64                  | -10,92                 | 0,72               | 3,34        |
| 14 | Latacunga-Manta             | 228,05            | -13,55                  | -13,66                 | 0,11               | 0,48        |
| 15 | Loja UTPL-Cachari           | 246,18            | 0,8                     | 0,03                   | 0,77               | 3,13        |
| 16 | IGM-Manta                   | 255,24            | -13,48                  | -13,27                 | 0,21               | 0,82        |
| 17 | Loja UTPL-Coral             | 274,35            | -6,66                   | -12,73                 | 6,07               | 22,13       |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona         | 280,08            | -3,07                   | -6,92                  | 3,85               | 13,75       |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul            | 291,5             | 8,44                    | 5,59                   | 2,85               | 9,78        |
| 20 | Loja UTPL-Balzar            | 300,44            | 0,37                    | -1,78                  | 2,15               | 7,16        |
| 21 | IGM-Barcelona               | 309,36            | -12,46                  | -13,4                  | 0,94               | 3,04        |
| 22 | Loja UTPL-El Desvio         | 335,88            | 0,37                    | -2,49                  | 2,86               | 8,51        |
| 23 | IGM-Anconcito               | 355,11            | -16,3                   | -20,75                 | 4,45               | 12,53       |
| 24 | Loja UTPL-Manta             | 375,13            | -4,09                   | -6,79                  | 2,7                | 7,20        |
| 25 | Anconcito-Pambamarca        | 388,97            | 16,35                   | 22,1                   | 5,75               | 14,78       |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo       | 407,84            | -1,15                   | -6,28                  | 5,13               | 12,58       |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle         | 418,39            | 9,13                    | 6,45                   | 2,68               | 6,41        |
| 28 | Anconcito-Redondo           | 430,57            | 16,21                   | 22,65                  | 6,44               | 14,96       |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua         | 444,41            | 8,54                    | 6,17                   | 2,37               | 5,33        |
| 30 | Loja UTPL-Catequilla        | 449,43            | 9,06                    | 6,41                   | 2,65               | 5,90        |
| 31 | Loja UTPL-Sacha             | 478,21            | 0,05                    | -3,03                  | 3,08               | 6,44        |
| 32 | Loja UTPL-Redondo           | 491,87            | 9,3                     | 8,38                   | 0,92               | 1,87        |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas        | 549,24            | -3,07                   | -5,45                  | 2,38               | 4,33        |
|    |                             |                   |                         |                        |                    |             |
|    |                             |                   |                         | <b>Média</b>           | <b>2,01</b>        | <b>8,94</b> |
|    |                             |                   |                         | <b>Desvio Padrão</b>   | <b>1,88</b>        | <b>8,86</b> |

TABELA 5.10 AVALIAÇÃO RELATIVA DO MODELO2 PARA MALHA DE 20km

| Nº | Linha-Base                  | Distância<br>(km) | $\Delta N_{GPS}$<br>(m) | $\Delta N_{GL}$<br>(m) | $\delta DN$<br>(m) | ppm<br>20km |
|----|-----------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|-------------|
| 1  | IGM-Casituaga               | 19,82             | -0,85                   | -0,96                  | 0,11               | 5,55        |
| 2  | Hospital del sur-Catequilla | 29,83             | -0,55                   | 0,09                   | 0,64               | 21,45       |
| 3  | IGM-Pambamarca              | 35,08             | 0,04                    | 1,01                   | 0,97               | 27,65       |
| 4  | Latacunga-Ilalo             | 65,19             | -0,18                   | 0,04                   | 0,22               | 3,37        |
| 5  | IGM-Redondo                 | 76,08             | -0,1                    | 1,89                   | 1,99               | 26,16       |
| 6  | Zagrun-Yausay               | 87,75             | -3,65                   | -2,87                  | 0,78               | 8,89        |
| 7  | Latacunga-Culaurco          | 98,46             | -7,88                   | -7,83                  | 0,05               | 0,51        |
| 8  | IGM-Lumbacui                | 132,77            | -5,44                   | -5,6                   | 0,16               | 1,21        |
| 9  | Latacunga-Balzar            | 155,33            | -9,1                    | -8,78                  | 0,32               | 2,06        |
| 10 | IGM-Sacha                   | 176,49            | -9,34                   | -9,8                   | 0,46               | 2,61        |
| 11 | Latacunga-Sacha             | 198,32            | -9,41                   | -10,1                  | 0,69               | 3,48        |
| 12 | IGM-Balzar                  | 202,65            | -9,03                   | -8,48                  | 0,55               | 2,71        |
| 13 | IGM-Minaya                  | 215,3             | -11,64                  | -11,12                 | 0,52               | 2,42        |
| 14 | Latacunga-Manta             | 228,05            | -13,55                  | -13,65                 | 0,1                | 0,44        |
| 15 | Loja UTPL-Cachari           | 246,18            | 0,8                     | -0,25                  | 1,05               | 4,27        |
| 16 | IGM-Manta                   | 255,24            | -13,48                  | -13,35                 | 0,13               | 0,51        |
| 17 | Loja UTPL-Coral             | 274,35            | -6,66                   | -13,98                 | 7,32               | 26,68       |
| 18 | Loja UTPL-Barcelona         | 280,08            | -3,07                   | -7,37                  | 4,3                | 15,35       |
| 19 | Loja UTPL-Mulmul            | 291,5             | 8,44                    | 4,88                   | 3,56               | 12,21       |
| 20 | Loja UTPL-Balzar            | 300,44            | 0,37                    | -1,78                  | 2,15               | 7,16        |
| 21 | IGM-Barcelona               | 309,36            | -12,46                  | -14,06                 | 1,6                | 5,17        |
| 22 | Loja UTPL-El Desvio         | 335,88            | 0,37                    | -2,6                   | 2,97               | 8,84        |
| 23 | IGM-Anconcito               | 355,11            | -16,3                   | -22,34                 | 6,04               | 17,01       |
| 24 | Loja UTPL-Manta             | 375,13            | -4,09                   | -6,65                  | 2,56               | 6,82        |
| 25 | Anconcito-Pambamarca        | 388,97            | 16,35                   | 23,44                  | 7,09               | 18,23       |
| 26 | Loja UTPL-Dominguillo       | 407,84            | -1,15                   | -6,42                  | 5,27               | 12,92       |
| 27 | Loja UTPL-Miravalle         | 418,39            | 9,13                    | 6,52                   | 2,61               | 6,24        |
| 28 | Anconcito-Redondo           | 430,57            | 16,21                   | 24,23                  | 8,02               | 18,63       |
| 29 | Loja UTPL-Casitagua         | 444,41            | 8,54                    | 6,22                   | 2,32               | 5,22        |
| 30 | Loja UTPL-Catequilla        | 449,43            | 9,06                    | 6,38                   | 2,68               | 5,96        |
| 31 | Loja UTPL-Sacha             | 478,21            | 0,05                    | -3,1                   | 3,15               | 6,59        |
| 32 | Loja UTPL-Redondo           | 491,87            | 9,3                     | 8,59                   | 0,71               | 1,44        |
| 33 | Loja UTPL-Esmeraldas        | 549,24            | -3,07                   | -5,67                  | 2,6                | 4,73        |
|    |                             |                   |                         |                        |                    |             |
|    |                             |                   |                         | <b>Média</b>           | <b>2,23</b>        | <b>8,86</b> |
|    |                             |                   |                         | <b>Desvio Padrão</b>   | <b>2,28</b>        | <b>8,10</b> |

### 5.3 RESUMO DA AVALIAÇÃO E ESCOLHA DO MODELO GEOIDAL

A tabela 5.11, mostra o resumo dos principais valores apresentados nas seções anteriores.

TABELA 5.11 RESUMO DA AVALIAÇÃO REALIZADA NOS MODELOS GEOIDAI

|                                      | MODELO1         |       |       |       |       | MODELO2 |       |       |       |
|--------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
|                                      |                 | 05km  | 10km  | 15km  | 20km  | 05km    | 10km  | 15km  | 20km  |
| A<br>B<br>S<br>O<br>L<br>U<br>T<br>A | Diferença Média | -0,48 | -0,43 | -0,44 | -0,29 | -0,12   | -0,08 | -0,08 | -0,16 |
|                                      | Máximo          | 0,90  | 0,57  | 1,15  | 1,25  | 2,24    | 2,63  | 2,80  | 2,86  |
|                                      | Mínimo          | -1,72 | -1,72 | -1,86 | -1,83 | -3,82   | -4,12 | -4,56 | -5,87 |
|                                      | Variação        | 2,62  | 2,29  | 3,01  | 3,08  | 6,06    | 6,75  | 7,36  | 8,73  |
|                                      | Desvio Padrão   | 0,65  | 0,62  | 0,71  | 0,70  | 1,34    | -1,44 | 1,57  | 1,78  |
|                                      |                 |       |       |       |       |         |       |       |       |
| R<br>E<br>L<br>A<br>T<br>I<br>V<br>A | Diferença Média | 0,51  | 0,52  | 0,63  | 0,79  | 1,64    | 1,90  | 2,01  | 2,23  |
|                                      | ppm             | 3,00  | 2,90  | 3,70  | 4,40  | 7,51    | 8,15  | 8,94  | 8,86  |
|                                      | Desvio Padrão   | 3,67  | 3,75  | 4,26  | 4,28  | 7,71    | 7,66  | 8,86  | 8,10  |

Observando na tabela 5.11, os resultados da avaliação absoluta dos valores máximo, mínimo, a variação entre eles e o correspondente desvio padrão, pode-se estabelecer que:

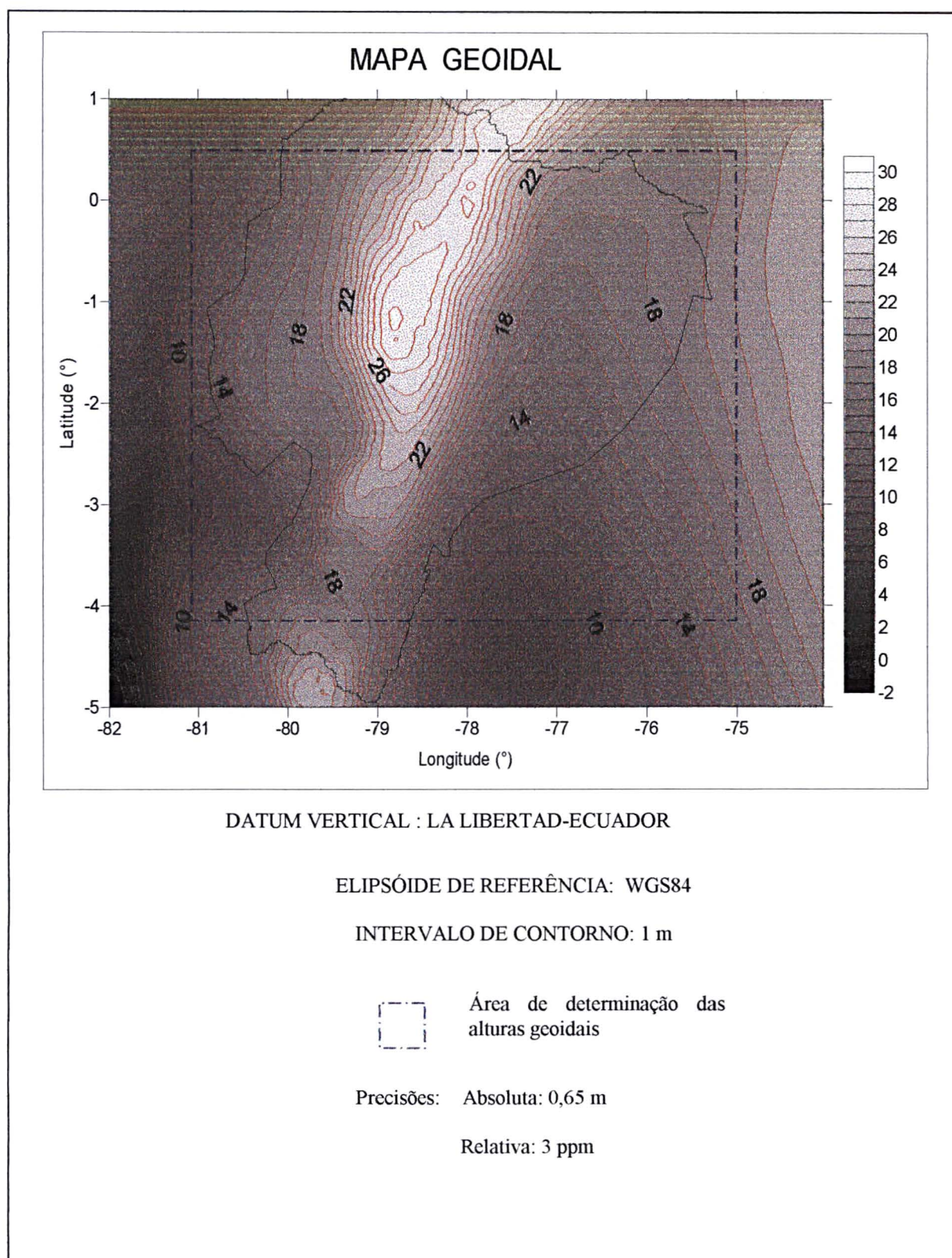
1. Os modelos geoidais que apresentaram as melhores estatísticas, foram do MODELO1.
2. Observando os resultados do MODELO1, indica que o modelo geoidal que melhor apresentou as estatísticas foi o desenvolvido com uma malha 10km, seguido pelo modelo com malha de 5km.

Observando na mesma tabela 5.11, os resultados da avaliação relativa dos valores da diferença média entre alturas geoidais, o erro relativo em partes por milhão da distância (ppm) e o seu desvio padrão, pode-se estabelecer que:

1. Os modelos geoidais que apresentaram as melhores resultados relativos foram aqueles baseados no MODELO1.
2. Observando-se os resultados do MODELO1, constata-se que o modelo geoidal com uma malha de 05km apresentou os melhores resultados, praticamente no mesmo nível qualitativo que o obtido com malha de 10km.

As diferenças estatísticas obtidas nos modelos geoidais com malha de 5km e 10km do MODELO1 não são significativas. Para efeitos práticos, devido à pequena variação, pode-se concluir que os dois modelos são equivalentes, porém tendo-se em vista que o obtido a partir da malha de 10km exige 4 vezes menos dados de entrada. No entanto, visando-se aplicações práticas é interessante uma rede mais densa de pontos de referência, uma vez que o modelo tem como objetivo fundamental a transformação de altitudes elipsoidais em “ortométricas” por interpolação. Tal é o caso das altitudes elipsóidicas obtidas com posicionamento baseado em técnicas espaciais que devem ser transformadas em altitudes “ortométricas” para as aplicações. Esta é a técnica mais usada atualmente e provavelmente por muito tempo ainda no futuro. Assim, com base nestes argumentos, pode-se concluir que o modelo geoidal que melhor adaptou-se a estas exigências, foi aquele com malha de 5km do MODELO1, constituindo-se no resultado final do presente trabalho. A figura 5.1, apresenta o Mapa Geoidal final da área de estudo, com suas principais características.

FIGURA 5.1 MAPA GEOIDAL LOCAL FINAL





## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo desta pesquisa consistiu em apresentar a integração de diferentes dados heterogêneos para gerar a malha de anomalias gravimétricas para obtenção de Geóide Gravimétrico Local. A área do Geóide foi definida pelos paralelos  $0,5^{\circ}$  e  $-4^{\circ}$  e entre os meridianos  $-75^{\circ}$  e  $-81^{\circ}$ ; a partir de dados irregularmente espaçados e com pouca densidade, foi atingido. Para seu desenvolvimento foram utilizadas observações gravimétricas, modelo geopotencial da Terra EGM96, modelo digital do terreno GTOPO30, modelo digital de variação lateral de densidades (MDD). Os pontos fundamentais para a constituição desta base de dados foram a complementação da rede gravimétrica na área, análise e validação de dados existentes, com verificação de redundâncias e de dados inconsistentes, assim como a geração de modelos digitais de elevação e de modelos digitais de variação lateral de densidades dentro dos limites requeridos pela metodologia aplicada. Estes aspectos já evidenciam uma das contribuições da tese.

Para a geração das malhas de anomalias foram aplicadas técnicas de aprendizagem baseadas no treinamento de Redes Neurais Artificiais (RNA). Para o cálculo das ondulações geoidais foi utilizada a técnica conhecida como “remover-restaurar” ou decomposição da altura geoidal em diferentes comprimentos de onda, com aplicação principal através da integração numérica de Stokes. O sistema geodésico de referência adotado para as coordenadas e a gravidade teórica foi o WGS-84(G873) e para as altitudes o datum La Libertad.

Para as altas montanhas deve ser calculada a anomalia de ar-livre com a fórmula de Somigliana, considerando a variação do gradiente normal da gravidade, caso contrário se pode introduzir erros de cerca de 2,5 mGal para uma altitude aproximada de 6000 m.

A análise de densidade das massas topográficas acima do geóide, ainda que considerando densidades médias para algumas grandes estruturas, evidenciou variações de até 14% e que devem ser levadas em consideração no cálculo da correção devido ao platô de Bouguer e da correção do terreno. O erro cometido na anomalia de Bouguer devido à densidade pode chegar até 14 mGal. No cálculo da Correção do Terreno usando o valor da densidade média de  $2,5 \text{ g/cm}^3$ , resultaram

diferenças de até  $-16$  mGal com relação ao valor calculado com a densidade de  $2,67$  g/cm<sup>3</sup>.

Para a predição de anomalias gravimétricas em áreas vazias a partir de dados distribuídos irregularmente e esparsos, a técnica de Redes Neurais Artificiais é um método que dá melhores resultados que o método clássico de Kriging, devido principalmente que as redes Neurais permitem usar no treinamento e predição tanto variáveis físicas quanto variáveis geométricas

Na região de estudo, para o treinamento das RNAs foi necessária somente uma terça parte dos dados gravimétricos totais disponíveis. Isto indica, que não é necessário realizar pontos gravimétricos com grande densidade. Foi constatado que é melhor seria fazer as medições, com maior densidade de pontos, em áreas onde existam mudanças da estrutura geológica, e tal que os pontos observados nestas estruturas possam ser considerados como pontos de referência para o treinamento de uma rede neural artificial e que as transições entre as regiões estejam representadas. Este fato pode explicar porque a predição direta das anomalias do ar livre apresentou melhores resultados que a obtida a partir da anomalia de Bouguer.

Também deve ser considerado que o modelo GTOPO30 usado para interpolar altitudes nos pontos da malha fornece altitudes médias para cada 30". Como a região de estudo possui fortes gradientes na topografia e grandes variações laterais de densidade, é possível que a aplicação do modelo tenha introduzido erros maiores para as anomalias Bouguer, onde além da correção do ar-livre, envolve também efeitos da coluna de crosta entre a estação e o Geóide.

A anomalia de ar-livre e de Bouguer preditas com uma Rede Neural do tipo Multicamada deu melhores resultados que as preditas com a Rede Neural de Função de Base Radial. Isto pode ter ocorrido em virtude da função de transferência na camada oculta ser diferente nos dois casos e que a função tangente hiperbólica ser melhor ajustada às variáveis físicas envolvidas na área de estudo, que a função gaussiana.

A avaliação absoluta do modelo geoidal final local gerado foi efetuada comparando suas ondulações com as originadas do rastreamento GPS e nivelamento em 31 pontos. A componente de diferença sistemática vertical entre o modelo e o datum vertical adotado foi de  $-0,48$  m e com uma precisão de  $0,65$  m. A avaliação relativa foi efetuada empregando 33 duplas diferenças entre ondulações,

apresentando um valor de 3 ppm. Este resultado indica que, com a utilização de técnicas de redes neurais, pode-se gerar uma malha de anomalias de ar-livre mesmo tendo uma alta correlação com o relevo topográfico. Evitando desta forma, a utilização da anomalia de Bouguer, que teoricamente é não correlacionada com a altitude, para calcular sua correspondente anomalia de ar-livre.

Com base nas conclusões anteriores e das experiências obtidas nas diferentes etapas da pesquisa, são feitas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

1. Tanto na correção devido ao platô de Bouguer quanto na correção do terreno usar um modelo de densidade variável, especialmente em áreas das altas montanhas e quando se quer determinar um modelo geoidal de alta precisão.
2. Deve-se usar um Modelo Digital do Terreno da área de estudo e das áreas vizinhas com maior resolução espacial, como seria o caso do MDT fornecido pelo satélite SRTM.
3. Realizar novas medições gravimétricas, especialmente nas áreas onde não existe informação e em diferentes estruturas geológicas, com a finalidade de retrainar a Rede Neural Multicamada e poder melhorar sua performance, e conseguir aumentar a precisão do modelo geoidal local pela melhor modelagem das variações laterais de densidade.
4. Fazer pesquisas relacionadas com a quantidade necessária e suficiente de pontos gravimétricos para a utilização de técnicas de redes neurais artificiais na geração de malhas de anomalias de ar-livre.
5. Usar as técnicas de redes neurais para a predição de anomalias de ar-livre com o objetivo de gerar as malhas gravimétricas.
6. Pesquisar sobre a arquitetura de uma rede neural artificial, tal que seu treinamento possa ser efetivado diretamente a partir de dados obtidos com GPS e nivelamento, objetivando a obtenção direta de modelo geoidal local, ou continental como no caso da obtenção do geóide para a América do Sul.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANA, J. **O Uso do GPS Na Elaboração de Carta Geoidal**. Curitiba, 2000. 164 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

BAJRACHARYA, S; KOTSAKIS, C; SIDERIS, M. **Aliasing Effects in Terrain Correction Computation Using Constant and Lateral Density Variation**. Enviado em: <correio eletrônico>. Acesso em: Junho do 2002.

BLITZKOW, D. A Preliminary Gravimetric Geoid for South America. In: **New Geoids in the World**. **IgeS Bulletin**, Itália, n.4, p. 53-66, 1997.

CRESSIE, N. **Statistics for Spatial Data**. ISU, New York, 1993.

ESCOLA DO GEOIDE. **Conjunto de Programas**. IAG/IBGE. Rio de Janeiro, 1997.

FAIRHEAD, J. **The South American Gravity Project (SGAP)**. Leeds: Department of Earth Sciences, Apr. 1991. Technical Report University of Leeds.

FELIPPETTO, M. **Predição Não-Linear de Séries Temporais Usando Redes Neurais RBF por Descomposição em Componentes Principais**. Campinas, 2001. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.

FORSBERG, R. **Terrain Effects in Geoid Computations**. In: **Lectures Notes of the International School for the Determination and Use of the Geoid**. International Geoid Service, Milan. Oct. 1994.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba: UFPR, 1999.

GEOPHYSICAL EXPLORATION TECHNOLOGY – GETECH. **Comunicação Pessoal**. Reino Unido, 2001.

GOSE, E.; JHONSONBAUGH, R.; JOST, S. **Pattern Recognition and Image Analysis**. New Jersey, 1996.

HAYKIN, S. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e Prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HEISKANEN, W.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. USA: W. H. Freeman and Company, 1967.

HULBUT, C. **Manual de Mineralogía de DANA**. Madrid: Universidad de Harvard, 1984.

IGAC – INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. **Comunicação Pessoal**. Colombia, 2001.

IGM – INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR. **Comunicação Pessoal**. Quito, Ecuador, 2003.

KITANIDIS, P. **Introduction to Geostatistics. Applications in Hidrogeology**. Cambridge, 1999.

KOVÁCS, Z. **Redes Neurais Artificias: Fundamentos e Aplicação**. 2. ed. São Paulo: Collegium Cognitivo, 1996.

LEIVA, C. **Determinación de Parámetros de Transformación entre los Sistemas PSAD56 y WGS84 para el País**. Sangolquí, 2003. 83 f. Tesis (Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente) – Facultad de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Escuela Politécnica del Ejército.

LEMOINE, F. P. et al. **The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96**. NASA/TP-1998-206861, July 1998.

LI, Y.; BRIDGWATER, J. Prediction of Extrusion Pressure Using an Artificial Neural Network. **Powder Technology**, v. 108, p. 65-73, 2000.

LOESCH, C.; SARI, S. **Redes Neurais Artificias. Fundamentos e Modelos**. Blumenau: FURB, 1996.

MARTINEC, Z.; VANICEK, P. The Indirect Effect of Topography in the Stokes-Helmert Technique for a Spherical Approximation of the Geoid. **Manuscripta Geodaetica**. v.19, p.213-219, 1994.

MATLAB. **The Ultimate Computing Environment for Technical Education: User Guide**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS DEL ECUADOR – MEM. **Comunicação Pessoal**. Quito, Ecuador, 2001.

MOSQUERA, C. **Petrografia Rocas Igneas Metamórficas y Sedimentarias**. Quito: U. Central, 1980.

MUÑOZ, A. **Aplicación de Técnicas de Redes Neuronales Artificiales al Diagnóstico de Procesos Industriales**. Madrid, 1996. 339 f. Tesis Doctoral-Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales-Departamento de Electrotécnica y Sistemas, Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

PACINO, M. **Geóide y Estructura Litosférica en la Argentina**. Rosario, 1999. 96f. Tese (Doctorado en Ingeniería área disciplinar Geotécnica)-Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.

PALADINES, A. ROSERO, G. **Zonificación Mineralogénica del Ecuador**. Quito: Laser Editores, 1996.



PESSOA, L. **Geóide Gravimétrico Local em Área da Bacia do Paraná**. Curitiba, 1997. 214 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

POTUKUCHI, S.; WEXLER, A. Predicting Vapor Pressures Using Neural Networks. **Atmospheric Environment**, Great Britain, v. 31, n. 4, p. 741-753, 1997.

RAPP, R. **The Use of Potential Coefficient Models in Computing Geoid Undulations**. In: Lectures Notes of the International School for the Determination and Use of the Geoid. International Geoid Service, Milan, p. 71-100, Oct. 1994.

SANDWELL, et. Al. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS1 Satellite Altimetry. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n.135, p. 1039-1054, 1997.

SIDERIS, M. **Geoid Determination by FFT Techniques**. In: Lectures Notes of the International School for the Determination and Use of the Geoid. International Geoid Service, Milan. p. 165-229, Oct. 1994.

SIDERIS, M.; SHE, B. A New, High-Resolution Geoid for Canada and Part of the U.S.A by the 1D-FFT method. **Bulletin Géodésique**, Berlin, v.69, p. 92-108, 1995.

SJÖBERG, L. The Atmospheric Geoid and Gravity Corrections. **Bolletino di Geodesia e Scienze Affini**, Italia, n. 4, p. 421-435, 1998.

SJÖBERG, L.; NAHAVANDCHI. The Atmospheric Geoid Effects in Stokes' formula. **Geophysics J. International**. n.140, p. 95-100, 2000

SUBCOMISSÃO DE GRAVIDADE E GEÓIDE PARA SUL AMÉRICA – SGGSA. Disponível em: <<ftp://geofis/ecuador/ecu.d>> . Acesso em: 07 jun. 2000.

SUBIZA, W. **A Determinação de um Modelo Geoidal de Precisão para o Uruguai**. Curitiba, 2000. 161 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

SURFER. **User Guide. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers: User's Guide**. Colorado: Golden Software, 1999.

TIERRA, A.; DE FREITAS, S. Predicting Free-Air Gravity Anomaly Using Artificial Neural Network. **International Association of Geodesy Symposia: Vertical Reference Systems**. Springer, v. 124, p 215-218, July 2002.

TIERRA, A. **Metodología para a Geração de Grid de Anomalias Gravimétricas para Obtenção de Geóide Gravimétrico Local a Partir de Dados Esparsos**. Seminário III de Qualificação, apresentado no CPGCG da Universidade Federal do Paraná, Brasil, p. 45, 2001.

TORGUE, W. **Gravimetry**. New York: de Gruyter, 1989.

TORGUE, W. **Geodesia**. México: Diana, 1983.

TSCHERNING, C. **Geoid Determination by Least-Squares Collocation using GRAVSOFT**. In: Lectures Notes of the International School for the Determination and Use of the Geoid. International Geoid Service, Milan, p. 135-164, Oct. 1994.

TVETER, D. **The Pattern Recognition: Basis of Artificial Intelligence**. Los Alamitos: IEEE COMPUTER SOCIETY, 1998.

VANÍČEK, P.; NOVÁK, P.; MARTINEC, Z. Geoid, Topography, and the Bouguer plate or shell. **Journal of Geodesy**, Berlin, v. 9, n.4, p. 210-215, July 2001.

## ANEXO I.

### PROGRAMA DA REDE NEURAL PROBABILISTICA

---

```
% RNA PROBABILISTICA para clasificao de densidades.
% Realizado por: Critiroal
%
```

---

```
clear all
format long g
```

```
%
% Recupera a matriz das amostras das diferentes classes.
% A Classe é o valor da densidade media da exstructure geológica
%
```

---

```
load MENTFL.txt;
P=MENTFL';
load MCLASE.txt;
clase=MCLASE';
Tc=clase;
plot(P(1,:),P(2,:),',' markersize',30)
for i=1:4,text(P(1,i)+0.1,P(2,i),sprintf('class%g',Tc(i))),end
axis([0 8 0 8])
%
```

---

```
%Começa o treinamento mediante o uso de uma Rede Neural de
%classificação probabilística (newpnn).
T=ind2vec(Tc);
spread =0.25;
net=newpnn(P,T,spread);
A=sim(net,P);
Ac=vec2ind(A);
```

```
plot(P(1,:),P(2,:),',' markersize',30)
for i=1:8,text(P(1,i)+0.1,P(2,i),sprintf('class%g',Ac(i))),end
%
```

---

```
% Grava a matriz do conhecimento da rede no arquivo teste.mat
save teste.mat
net;
%
%TERMINA PROGRAMA DE TREINAMENTO
%
```

---

```

%INICA PROCESSO DE PREDICAO
% Programa para classificar áreas geológicas de acordo ao valor
% das suas densidades
% Realizado por: Critiroal
clear all
format long g
%


---


% Grava o arquivo de dados para predezir, a primeira coluna é a latitude
% a segunda coluna é a longitude
load dgri05k.txt;
p=dgri05k';
%


---


% Recupera a matriz do conhecimento que foi determinado pelo treinamento
% da Rede Neural Artificial
load teste.mat;
%


---


% Faz a classificação para o arquivo de dados a predezir
%


---


a=sim(net,p);
ac=vec2ind(a);
plot(p(1,:),p(2:),'+', 'markersize',30)
text(p(1)+0.1,p(2),sprintf('class %g',ac))
% Termina a Classificação
%


---


% A classe é transformada para o valor de densidade
[filas colunas] =size(ac);
MDENSI= dgri05k;
for i=1: colunas
    if ac(1,i)==1
        MDENSI(i,3)=2.62;
    elseif ac(1,i)==2
        MDENSI(i,3)=2.58;
    elseif ac(1,i)==3
        MDENSI(i,3)=2.48;
    elseif ac(1,i)==4
        MDENSI(i,3)=2.42;
    elseif ac(1,i)==5
        MDENSI(i,3)=2.7;
    elseif ac(1,i)==6
        MDENSI(i,3)=2.75;
    elseif ac(1,i)==7
        MDENSI(i,3)=1.027;
    elseif ac(1,i)==8
        MDENSI(i,3)=2.67;
    end
end
end
%


---



```

```
% Grava num arquivo.txt a longitude , latitude e densidade
fid = fopen('densidad05km.txt','w');

for i=1:coluna

    fprintf(fid,'%11.5f %11.5f %6.3f\n ',MDENSI(i,1),MDENSI(i,2),MDENSI(i,3));

end

fclose(fid);

% FIM DO PROGRAMA DE PREDICAO

% FIM DO PROGRAMA DE TREINAMENTO E CLASSIFICACAO
```

## ANEXO II

### PROGRAMA DE UMA RED NEURAL MULTICAMADA

```
%
%
% Programa para treinar uma RNA por Feedforward-Backpropagation
% As entradas são: latitude, longitude, altitude, gravidade normal
% Realizado por: Critiroal
%

% INICIO DO PROGRAMA

% Definição de dados a ser usados

clear all
format long g

load ventre7879.txt; % Recupera a matriz de entrada
load vsatre7879.txt; % Recupera a matriz de saída (desejada)

ventrada=ventre7879';
vsaida=vsatre7879';
% Normaliza a entrada e saída com média e desvio padrão igual a 1, vai ficar entre -
4 e 4
[ventnor,meanventrada,stdventrada,vsainor,meanvsaida,stdvsaida] =
prestd(ventrada,vsaida);

% Aqui define-se os valores limites mínimo e máximo das entradas com minmax
% plotea os pontos versus os de saída.
% inicia a rede supervisionada

% tansig é a função de transferência na camada oculta e
% purelin na camada de saída.
P=ventnor;
T=vsainor;

load venpre7879.txt; % arquivo de dados de entrada para predição
load vsaeva7879.txt; % arquivo para avaliar a RNA

venpre=venpre7879';
vsaeva=vsaeva7879';
vprenor = trstd(venpre,meanventrada,stdventrada); % normaliza com a média e
desvio
% padrão calculado com o vetor de entrada para o treinamento.
vsaevanor=trstd(vsaeva,meanvsaida,stdvsaida);

VV.P= vprenor;
```



```

VV.T= vsaevanor;
net = newff(minmax(ventnor),[5 1],{'tansig' 'purelin'},'trainlm');

Y = sim(net,ventnor);

net.trainParam.epochs = 2500;
net.trainParam.show = 5;
net.trainParam.goal=0.05055;
net.trainParam.time= inf;
net=init(net);
[net,tr] = train(net,ventnor,vsainor,[],[],VV);
%net= train(net,ventnor,vsainor);
plotperf(tr)

% _____

% Aqui o conhecimento é gravado numa matriz, que servirá para as predições
save redbp78794.mat;
net;

% _____

% Mostra uma matriz de pesos da camada oculta PESO1, e na camada de saida PESO2
peso1=net.iw{1};
peso2=net.lw{2};

% _____
% Coloca num vetor os bias da camada oculta BIAS1, e da camada de saida BIAS2
bias1=net.b{1};
bias2=net.b{2};
%-----
%-----
%Predicao usando a RNA treinada
%-----

prediz=sim(net,vprenor);

bougue=poststd(prediz,meanvsaida,stdvsaida);
dgbou=bougue';

[filu colu]=size(dgbou);

difbou=dgbou-vsaeva';
mediadif=mean(difbou)
desvpad=std(difbou)

mindif=min(abs(difbou))
maxdif=max(abs(difbou))

```

```

% Aqui o conhecimento é gravado numa matriz, que servirá para as predições
% save predicacao.mat % Matriz do conhecimento
% net;

venpre=venpre';

fid =fopen('alibre78794.txt','w');

for i=1:fila
    fprintf(fid,'%9.4f %9.4f %9.4f %9.4f
%9.2f\n',venpre(i,1),venpre(i,2),venpre(i,3),dgbou(i,1),difbou(i,1));
end
fclose(fid);

% TERMINA O PROGRAMA DE TREINAMENTO E PREDICAO

```

## ANEXO III

### PROGRAMA DE UMA REDE NEURAL RBF

```
%
%Programa de treinamento de uma RNA usando Funcoes de Base Radial
% Realizado por : Critiroal
%
clear all
format long g

load ventreoeste4f.txt; % Recupera a matriz de entrada
load vsatreoste4f.txt; % Recupera a matriz de saida desejada

%[fila coluna]=size(dtrentsv);
%

ventrada=ventreoeste4f;
vsaida=vsatreoste4f;

% Normaliza a entrada e saida com media zero e desvio padrao igual a 1, vai ficar
entre -4 e 4
[ventnor,meanventrada,stdventrada,vsainor,meanvsaida,stdvsaida] =
prestd(ventrada,vsaida);

goal=25;% Meta desejada
spread=1;
net=newrb(ventnor,vsainor,goal,spread,3000,2);
figure;
plot (ventnor,vsainor,'+');
Y1=sim(net,ventnor);
save redrbfper4.mat;
net;

hold on; plot (ventnor,Y1);

peso1=net.iw{1};
peso2=net.lw{2};

%
% Coloca num vetor os bias da camada oculta BIAS1, e da camada de saida BIAS2
bias1=net.b{1};
bias2=net.b{2};

%
load vsaevaoeste.txt; % dados de avalia]ao para a RNA
```

```

load venpreoeste.txt;% Recupera os dados a ser preditos sin escalonar
[filal colunall]=size(venpreoeste);

venpreco=venpreoeste';
vprenor = trastd(venpreco,meanventrada,stdventrada); % normaliza com a media e
desvio
% padrao calculado com o vetor de
% de entrada para o treinamento.
% _____
% _____

bouguenor=sim(net,vprenor);

plot(vprenor,bouguenor,'r*');
hold off;

% _____

bougue=poststd(bouguenor,meanvsaida,stdvsaida);

dgbou=bougue';

[nf nc]=size(dgbou);
%%-----
%-----
% Calculo das diferencias obtidas e de estatisticas
difbou=dgbou-vsaevaoeste;

mediadif= mean(difbou)
emqdif=std(difbou)
minabs=(min(abs(difbou)))
maxabs=(max(abs(difbou)))
%-----
%-----
% Grava num arquivo os valores
fid = fopen('bougueoeste.txt','w');

for i=1:nf

    fprintf(fid,'%10.6f %11.6f %9.3f %9.3f %9.3f\n ',venpreoeste(i,1),
venpreoeste(i,2),venpreoeste(i,3),dgbou(i,1),difbou(i,1) );
end
fclose(fid);

%TERMINA PROGRAMA

% TERMINA PROGRAMA DE TREINAMENTO E PREDICAO

```